

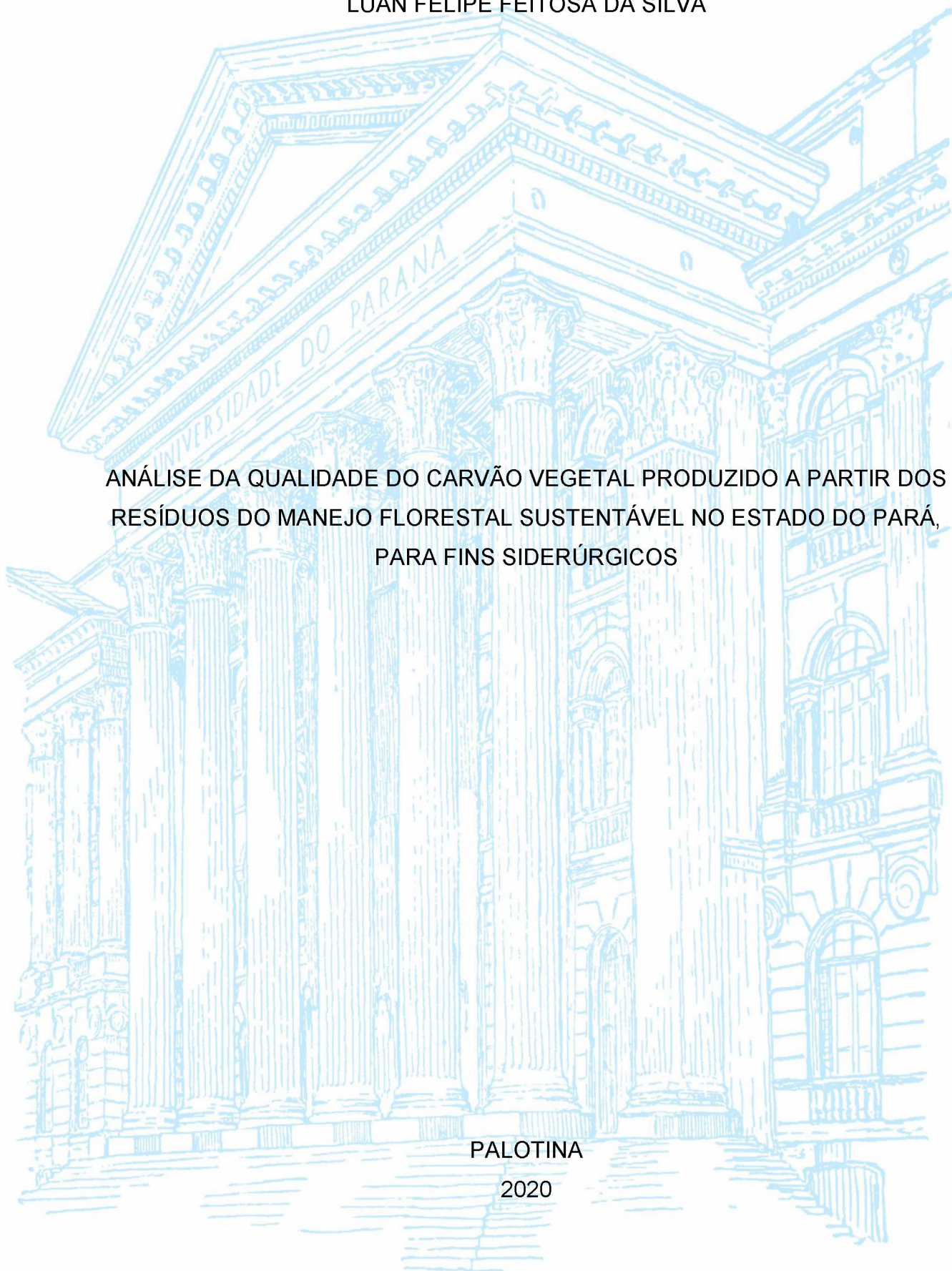
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUAN FELIPE FEITOSA DA SILVA

ANÁLISE DA QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL PRODUZIDO A PARTIR DOS  
RESÍDUOS DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL NO ESTADO DO PARÁ,  
PARA FINS SIDERÚRGICOS

PALOTINA

2020



LUAN FELIPE FEITOSA DA SILVA

ANÁLISE DA QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL PRODUZIDO A PARTIR DOS  
RESÍDUOS DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL NO ESTADO DO PARÁ,  
PARA FINS SIDERÚRGICOS

Dissertação apresentada ao curso Pós-Graduação em Bioenergia, Área de Concentração em Produção de Biocombustíveis e Co-Produtos, Setor Palotina, Universidade Federal do Paraná, como requisito à obtenção do Título de Mestre em Bioenergia.

Orientador: Prof. Dr. Joel Gustavo Teleken

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Adriana Ferla de Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Sueo Numazawa

PALOTINA

2020

## FICHA CATALOGRAFICA

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S587 Silva, Luan Felipe Feitosa da  
Análise da qualidade do carvão vegetal produzido a partir dos  
resíduos do manejo florestal sustentável no estado do Pará, para  
fins siderúrgicos / Luan Felipe Feitosa da Silva – Palotina, 2020.  
96f.

Orientador: Joel Gustavo Teleken  
Coorientadora: Adriana Ferla de Oliveira  
Coorientador: Sueo Numazawa  
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná,  
Setor Palotina, Programa de Pós-graduação em Bioenergia.

1. Biocombustível sólido. 2. Biorredutor. 3. Carbono fixo. 4.  
Ferro. 5. Siderurgia. I. Teleken, Joel Gustavo. II. Oliveira, Adri-  
ana Ferla de. III. Numazawa, Sueo. IV. Universidade Federal do  
Paraná. V. Título.

CDU 620.9



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR PALOTINA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO BIOENERGIA - UEL - UEM - UEPG - UNICENTRO - UNIOESTE - UFPR 40002012041P8

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em BIOENERGIA - UEL - UEM - UEPG - UNICENTRO - UNIOESTE - UFPR da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **LUAN FELIPE FEITOSA DA SILVA** intitulada: **ANÁLISE DA QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL PRODUZIDO A PARTIR DOS RESÍDUOS DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL NO ESTADO DO PARÁ, PARA FINS SIDERÚRGICOS**, sob orientação do Prof. Dr. JOEL GUSTAVO TELEKEN, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Palotina, 03 de Junho de 2020.

Assinatura Eletrônica

03/06/2020 19:49:34.0

JOEL GUSTAVO TELEKEN

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

03/06/2020 17:33:43.0

WILSON DE AGUIAR BENINCA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

03/06/2020 17:45:42.0

EDUARDO LUCAS KONRAD BURIN

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)



## DEDICATÓRIA

*A minha avó, Maria Leide da Conceição Feitosa  
Iremos nos reencontrar em breve.*

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço primeiramente à Deus e aos bons espíritos que me acompanham durante toda a minha passagem por essa vida.

À minha família, meus pais, Claudio Macedo e Katia Feitosa, a minha irmã Lais Caroline, pelo todo amor genuíno que tens me dado durante minha vida.

Agradeço ao orientador Joel Gustavo Teleken por aceitar conduzir o meu trabalho de pesquisa.

À coorientadora Professora Adriana Ferla de Oliveira, pela contribuição na realização das análises e ensinamentos.

Ao Professor Sueo Numazawa, pelas contribuições, ensinamentos e confiança para a construção desse projeto de pesquisa. Foi muito gratificante e honrado o repasse de conhecimentos que foram de grande importância no desenvolvimento da minha vida profissional.

Aos professores, Denes Barros e Vanessa Pamplona pelos ensinamentos repassados.

Ao Engenheiro Florestal Eliel Galvão, pela disponibilidade e conhecimento repassado durante o trabalho no laboratório.

Ao grupo CIKEL -CKBV/CBNS pela oportunidade de realizar toda a parte experimental desse trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão da bolsa de estudos.

À minha grande amiga Elizabeth Lebrege, pelo carinho e parceria no desenvolvimento do trabalho de campo.

Aos meus amigos, Antonio Renan, Jade Franco, Fernando Nunes, Mizael Cirineu, Alexandre Carvalho, Rafaely Pantoja, Regiane Ferreira, Diego Souza, Josué Tuma, Carlos Cavalcante, Yuri Carvalho, Aline Falcão, Murilo Queiroz e Rafael Teles.

Aos meus amigos do mestrado, Nathiely Catarine, Bruno Rovere e André Felipe.

*“Deus é brasileiro e anda do meu lado”*

*Antônio Carlos Belchior.*

## RESUMO

O carvão vegetal está presente em diferentes e inúmeras atividades desenvolvidas em nosso cotidiano, seja nas residências no preparo de alimentação, na indústria farmacêutica, na indústria química como carbono, grafite, filtros e principalmente, nas indústrias siderúrgicas, usado como gerador de energia e redutor de minério. No entanto, a tecnologia utilizada para a produção de carvão vegetal na região Norte do Brasil é considerada obsoleta. O objetivo do trabalho foi avaliar o rendimento e a qualidade do carvão vegetal direcionado a indústria siderúrgica, testando diferentes grupos de resíduos do manejo florestal sustentável, organizados em dois grupos de básica da madeira e utilizando dois ciclos de carbonização, 10 e 12 dias. As carbonizações foram realizadas utilizando-se 10 fornos para cada grupo de densidade básica, com ciclo de carbonização de 10 e 12 dias, sendo 5 fornos para cada ciclo, totalizando 20 fornos no experimento. Foram avaliadas, o rendimento gravimétrico em carvão, características físicas referentes a densidade à granel e densidade básica, características químicas imediatas sobre teores de umidade, materiais voláteis, carbono fixo e cinzas, e também sobre a constituição química elementar de carbono, nitrogênio e hidrogênio, análise termogravimétrica, poder calorífico superior e, finalmente, a característica de resistência mecânica referente a friabilidade do carvão. O experimento foi realizado no Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), com arranjo fatorial 2x2 (grupo de densidade x tempo de carbonização) resultando em 4 tratamentos, com 5 repetições (fornadas). Os valores de rendimento gravimétrico em carvão variaram de 19,81 a 24,38% para os carvões produzidos no G2 D12 e G1 D12, respectivamente. O carvão do G1 nos ciclos de carbonização de 10 e 12 dias foram medianamente friáveis (19,51% e 19,25%) do G2 carbonizados em 10 e 12 dias foram poucos friáveis (12,11% e 12,48%). O Teor de umidade não foi influenciado pelos tratamentos empregados, apresentando média de 7,6%. O carvão produzido no G2 D12 apresentou a média de teor de materiais voláteis de 26,51% e o carvão do G1 12 dias apresentou a média de 22,31%. O poder calorífico do carvão varia entre os grupos de densidade dos resíduos estudados, apresentando o maior valor para o grupo de madeiras com maior densidade carbonizadas em 10 e 12 dias. A concentração de carbono elementar foi superior para o grupo G1 D10 e G1 D12. Os valores para os teores de H, indicaram pequena variação entre os carvões produzidos, com valores de 4,36% para G1 D10 e de 4,99% para G1 D12. Considerando que o carvão obtido de G1 D12 apresentou o maior teor de carbono elementar, consequentemente, influenciando no poder calorífico superior do combustível. O comportamento durante a degradação térmica dos carvões obtidos foi muito semelhante com perdas de massa, mais acentuadas numa faixa aproximada de temperatura e com picos de energia liberada, expressos pela análise térmica diferencial, também bem próximos. Em relação ao aproveitamento de resíduos do manejo florestal sustentável, todos os grupos de madeira podem ser confirmados para a produção de carvão vegetal e, ainda, considerando que a carbonização é um processo alternativo para mitigar o passivo ambiental causado pelos resíduos, evitando-se o descarte no meio ambiente. Conclui-se, portanto, que o carvão de resíduos de exploração florestal é mais um produto comercializável de origem renovável e de boa qualidade energética, além de proporcionar a agregação de valor aos resíduos e um melhor aproveitamento da biomassa florestal.

**Palavras-Chave:** Biocombustível Sólido, Biorredutor, Carbono fixo, Ferro, Siderurgia.

## ABSTRACT

Charcoal is present in different and countless activities developed in our daily lives, whether in the homes in food preparation, in the pharmaceutical industry, in the chemical industry such as carbon, graphite, filters and mainly in the steel industries, used as an energy generator and reducer ore. However, the technology used to produce charcoal in northern Brazil is considered obsolete. The objective of the study was to evaluate the yield and quality of charcoal directed to the steel industry, testing different groups of residues from sustainable forest management, organized in two groups of basic wood and using two carbonization cycles, 10 and 12 days. Carbonizations were performed using 10 ovens for each group of basic density, with a carbonization cycle of 10 and 12 days, with 5 ovens for each cycle, totaling 20 ovens in the experiment. The gravimetric yield on charcoal, physical characteristics related to bulk density and basic density, immediate chemical characteristics on moisture content, volatile materials, fixed carbon and ash were evaluated, as well as on the elemental chemical constitution of carbon, nitrogen and hydrogen, thermogravimetric analysis, superior calorific value and, finally, the mechanical resistance characteristic related to the friability of the charcoal. The experiment was carried out in an Entirely Randomized Design (DIC), with a 2x2 factorial arrangement (group of density x carbonization time) resulting in 4 treatments, with 5 repetitions (batches). The values of gravimetric yield in charcoal ranged from 19.81 to 24.38% for the charcoal produced in G2 D12 and G1 D12, respectively. The charcoal from G1 in the carbonization cycles of 10 and 12 days was moderately friable (19.51% and 19.25%) of the carbonized G2 in 10 and 12 days were slightly friable (12.11% and 12.48%). The moisture content was not influenced by the treatments used, presenting an average of 7.6%. The charcoal produced in G2 D12 had an average volatile material content of 26.51% and coal in G1 12 days had an average of 22.31%. The calorific value of the charcoal varies between the groups of density of the studied residues, presenting the highest value for the group of woods with the highest carbonized density in 10 and 12 days. The elemental carbon concentration was higher for the G1 D10 and G1 D12 groups. The values for the levels of H indicated little variation between the charcoal produced, with values of 4.36% for G1 D10 and 4.99% for G1 D12. Considering that the charcoal obtained from G1 D12 had the highest elemental carbon content, consequently influencing the superior calorific power of the fuel. The behavior during the thermal degradation of the obtained coals was very similar with mass losses, more accentuated in an approximate temperature range and with peaks of released energy, expressed by the differential thermal analysis, also very close. Regarding the use of residues from sustainable forest management, all wood groups can be confirmed for the production of charcoal and, furthermore, considering that carbonization is an alternative process to mitigate the environmental liabilities caused by the residues, avoiding the disposal in the environment. It is concluded, therefore, that the charcoal from forest exploitation residues is yet another marketable product of renewable origin and of good energy quality, besides providing added value to the residues and a better use of the forest biomass.

**Keywords:** Solid Biofuel, Bio reducer, Fixed carbon, Iron, Steel.



## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1 - REPARTIÇÃO DA OFERTA DE ENERGIA .....</b>	<b>23</b>
<b>FIGURA 2 - MODELO DE CARBONIZAÇÃO DE KANURY E BLACKSHEAR .....</b>	<b>25</b>
<b>FIGURA 3 - MODELO DO FORNO RABO-QUENTE .....</b>	<b>28</b>
<b>FIGURA 4 - MODELO DO FORNO COLMÉIA .....</b>	<b>29</b>
<b>FIGURA 5 - MODELO DO FORNO CAIEIRA .....</b>	<b>30</b>
<b>FIGURA 6 - MODELO DO FORNO MATÁLICO .....</b>	<b>30</b>
<b>FIGURA 7 - MODELO DO FORNO RETANGULAR .....</b>	<b>31</b>
<b>FIGURA 8 - MODELO DO FORNO CONTAINER .....</b>	<b>32</b>
<b>FIGURA 9 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA FAZENDA RIO CAPIM, PARAGOMINAS, PARÁ, BRASIL .....</b>	<b>36</b>
<b>FIGURA 10 - RESÍDUOS FLORESTAIS UTILIZADOS NO ESTUDO .....</b>	<b>38</b>
<b>FIGURA 11 - PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA .....</b>	<b>39</b>
<b>FIGURA 12 - GRUPOS DE RESÍDUOS FLORESTAIS AGRUPADOS DE ACORDO COM A DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA .....</b>	<b>41</b>
<b>FIGURA 13 - COMPLEXO DE PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL, FAZENDA RIO CAPIM, PARAGOMINAS, PARÁ, BRASIL .....</b>	<b>42</b>
<b>FIGURA 14 - FORNO RABO-QUENTE UTILIZADO NA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL .....</b>	<b>43</b>
<b>FIGURA 15 - PREPARAÇÃO DOS RESÍDUOS PARA O PROCESSO DE CARBONIZAÇÃO .....</b>	<b>43</b>
<b>FIGURA 16 - DETERMINAÇÃO DO MASSA DOS RESÍDUOS ENFORNADOS .....</b>	<b>44</b>
<b>FIGURA 17 - PROCESSO DE ENCHIMENTO DOS FORNOS .....</b>	<b>44</b>
<b>FIGURA 18 - LAYOUT DO ESQUEMA DE CARBONIZAÇÃO AVALIADO NO ESTUDO .....</b>	<b>45</b>
<b>FIGURA 19 - PROCESSO DE RESFRIAMENTO DOS FORNOS .....</b>	<b>46</b>
<b>FIGURA 20 - PROCESSO DE DESCARREGAMENTO E PESAGEM DO CARVÃO VEGETAL PRODUZIDO .....</b>	<b>46</b>
<b>FIGURA 21 - ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE A GRANEL DO CARVÃO VEGETAL .....</b>	<b>48</b>

<b>FIGURA 22 - AMOSTRAS DE CARVÃO VEGETAL COLETADAS PARA O ESTUDO DAS PROPRIEDADES .....</b>	<b>49</b>
<b>FIGURA 23 - ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DA FRIABILIDADE DO CARVÃO VEGETAL .....</b>	<b>49</b>
<b>FIGURA 24 - ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA DO CARVÃO VEGETAL .....</b>	<b>51</b>
<b>FIGURA 25 - ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DA QUÍMICA IMEDIATA DO CARVÃO VEGETAL .....</b>	<b>51</b>
<b>FIGURA 26 - ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO CARVÃO VEGETAL .....</b>	<b>54</b>
<b>FIGURA 27 - APARELHO STA 600 DA MARCA PERKIN ELMER .....</b>	<b>56</b>
<b>FIGURA 28 - RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO DO CARVÃO VEGETAL (%) EM CADA CARBONIZAÇÃO AVALIADA .....</b>	<b>59</b>
<b>FIGURA 29 - DENSIDADE A GRANEL DO CARVÃO VEGETAL (<math>\text{kg.m}^{-3}</math>) EM CADA CARBONIZAÇÃO AVALIADA .....</b>	<b>60</b>
<b>FIGURA 30 - FRIABILIDADE DO CARVÃO VEGETAL (%) EM CADA CARBONIZAÇÃO AVALIADA .....</b>	<b>62</b>
<b>FIGURA 31 - DENSIDADE BÁSICA DO CARVÃO VEGETAL (<math>\text{g.cm}^{-3}</math>) EM CADA CARBONIZAÇÃO AVALIADA .....</b>	<b>64</b>
<b>FIGURA 32 - TEOR DE UMIDADE DO CARVÃO VEGETAL (%) CARBONIZAÇÃO AVALIADA .....</b>	<b>68</b>
<b>FIGURA 33 - TEOR DE MATERIAIS VOLÁTEIS DO CARVÃO VEGETAL (%) EM CADA CARBONIZAÇÃO AVALIADA .....</b>	<b>67</b>
<b>FIGURA 34 - TEOR DE CARBONO FIXO DO CARVÃO VEGETAL (%) EM CADA CARBONIZAÇÃO AVALIADA .....</b>	<b>69</b>
<b>FIGURA 35 - TEOR DE CINZAS DO CARVÃO VEGETAL (%) EM CADA CARBONIZAÇÃO AVALIADA .....</b>	<b>71</b>
<b>FIGURA 36 - PODER CALORÍFICO SUPERIOR (<math>\text{kcal kg}^{-1}</math>) DO CARVÃO VEGETAL EM CADA CARBONIZAÇÃO AVALIADA .....</b>	<b>73</b>
<b>FIGURA 37 - COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DO CARVÃO VEGETAL EM CADA CARBONIZAÇÃO AVALIADA .....</b>	<b>75</b>
<b>FIGURA 38 - CURVA TG E CURVA DTG DO CARVÃO VEGETAL EM CADA CARBONIZAÇÃO AVALIADA .....</b>	<b>78</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1 - PROPORÇÃO DA CELULOSE, HEMICELULOSE, LIGNINA E EXTRATIVOS NA MADEIRA .....</b>	<b>26</b>
<b>TABELA 2 - PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL PARA USO SIDERÚRGICO .....</b>	<b>35</b>
<b>TABELA 3 - AGRUPAMENTO DAS ESPÉCIES EM FUNÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA <math>\geq 750 \text{ kg.m}^{-3}</math> .....</b>	<b>40</b>
<b>TABELA 4 - AGRUPAMENTO DAS ESPÉCIES EM FUNÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA <math>&lt; 750 \text{ kg.m}^{-3}</math> .....</b>	<b>40</b>
<b>TABELA 5 - DELINEAMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>57</b>
<b>TABELA 6 - VALORES DE TESTE DE FISHER OBTIDOS COM BASE NA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO, DENSIDADE A GRANEL, FRIABILIDADE E DENSIDADE BÁSICA, UMIDADE, MATERIAIS VOLÁTEIS, CARBONO FIXO, CINZAS E PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO CARVÃO VEGETAL .....</b>	<b>59</b>
<b>TABELA 7 - CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO VEGETAL QUANTO SUA FRIABILIDADE .....</b>	<b>64</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

%	–	Porcentagem
<	–	Menor que
>	–	Maior que
≥	–	Maior ou igual
°C	–	Graus Celsius
ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	–	Análise de Variância
ASTM	–	American Society for Testing and Materials
BEN	–	Balanço Energético Nacional
BS	–	Base seca
BU	–	Base Úmida
C	–	Carbono
cm	–	Centímetro
DIC	–	Delineamento inteiramente casualizado
FRI	–	Friabilidade
g.cm <sup>-3</sup>	–	Grama por centímetro cúbico
H	–	Hidrogênio
IBÁ	–	Indústria Brasileira de Árvores
kcal kg <sup>-1</sup>	–	Quilocaloria por quilograma
kg.m <sup>-3</sup>	–	Quilograma por metro cúbico
m	–	Metro
m <sup>-3</sup>	–	Metro cúbico
Mcal m <sup>-3</sup>	–	Megacaloria por metro cúbico
mm	–	Milímetro
N	–	Nitrogênio
PCS	–	Poder calorífico superior
RGC	–	Rendimento gravimétrico em carvão
st	–	Estéreo
t	–	Tonelada
TCF	–	Teor de carbono fixo
TCZ	–	Teor de cinzas
TMV	–	Teor de materiais voláteis

TU	–	Teor de umidade
UFPR	–	Universidade Federal do Paraná
UFRA	–	Universidade Federal Rural da Amazônia
UFSCAR	–	Universidade Federal de São Carlos
UTFPR	–	Universidade Tecnológica Federal do Paraná



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1. JUSTIFICATIVA .....	18
1.2. OBJETIVOS .....	20
1.2.1. Objetivo geral .....	20
1.2.2. Objetivos específicos .....	20
<b>2. REVISÃO DE LITERATURAS .....</b>	<b>21</b>
2.1. CONTEXTO ENERGÉTICO .....	21
2.2. CINÉTICA DA CARBONIZAÇÃO .....	23
2.3. CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA E DE SEUS COMPONENTES .....	25
2.4. TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL .....	26
2.4.1. Forno rabo-quente .....	27
2.4.2. Forno de superfície colmeia .....	27
2.4.3. Forno caieira .....	28
2.4.4. Forno metálico .....	29
2.4.5. Forno retangular .....	30
2.4.6. Forno container .....	31
2.5. QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL PARA USO EM ALTO-FORNO .....	32
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>35</b>
3.1. ÁREA DE ESTUDO .....	35
3.2. SELEÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DAS ESPÉCIES .....	36
3.3. PROCESSO DE CARBONIZAÇÃO .....	40
3.4. PREPARAÇÃO DOS RESÍDUOS PARA O PROCESSO DE CARBONIZAÇÃO.....	42
3.5. DETERMINAÇÃO DA MASSA DOS RESÍDUOS E ENCHIMENTO DOS FORNOS .....	43
3.6. ESQUEMA DE CARBONIZAÇÃO .....	44
3.7. PROCESSO DE RESFRIAMENTO E DESCARREGAMENTO DOS FORNOS .....	45
3.8. DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO E QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL .....	46
3.8.1. Rendimento gravimétrico em carvão vegetal .....	46

3.8.2. Densidade a granel do carvão vegetal .....	47
3.8.3. Friabilidade do carvão vegetal .....	48
3.8.4. Densidade básica do carvão vegetal .....	59
3.8.5. Análises químicas imediatas do carvão vegetal (umidade, voláteis, carbono fixo e cinzas) .....	50
3.8.6. Poder calorífico superior do carvão vegetal (PCS) .....	53
3.8.7. Química elementar do carvão vegetal (C, N, H) .....	54
3.8.8. Análise termogravimétrica do carvão vegetal (TG/DTG) .....	54
<b>4. ANÁLISE ESTATÍSTICA .....</b>	<b>56</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>58</b>
5.1. Rendimento gravimétrico do carvão vegetal .....	59
5.2. Densidade a granel do carvão vegetal .....	60
5.3. Friabilidade do carvão vegetal .....	61
5.4. Densidade básica do carvão vegetal .....	63
5.5. Teor de umidade do carvão vegetal .....	65
5.6. Teor de materiais voláteis do carvão vegetal.....	66
5.7. Teor de carbono fixo do carvão vegetal .....	68
5.8. Teor de cinzas do carvão vegetal .....	70
5.9. Poder calorífico superior do carvão vegetal .....	71
5.10. Análise elementar do carvão vegetal (C, N, H) .....	73
5.11. Análise termogravimétrica do carvão vegetal (TG/DTG) .....	76
<b>6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES .....</b>	<b>79</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>81</b>
<b>ANEXO 1 – AUTORIZAÇÃO DE EXPLORAÇÃO FLORESTAL – AUTEF-SEMAS .....</b>	<b>91</b>
<b>APÊNDICE 1 – IMAGENS ILUSTRATIVAS DO TRABALHO .....</b>	<b>92</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico e o progresso da sociedade trouxeram consigo implicações acerca dos recursos energéticos, principalmente, quanto à sua disponibilidade, fonte e eficiência, com isso surgiu a necessidade de se buscar novas fontes renováveis e o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes para produção de energia, no intuito de substituir o uso dos combustíveis fósseis (FEUERBACHER et al., 2016; ELOY et al., 2018).

Segundo dados do Balanço Energético Nacional, a participação de fontes renováveis na matriz energética brasileira atingiu 45,3 % em 2018, sendo dividida em utilização de bagaço de cana-de-açúcar (17,4 %), hidráulica (12,6 %), lenha e carvão vegetal (8,4 %) e lixiviação e outras fontes (6,9 %) (EPE, 2019).

A biomassa florestal utilizada para produção de carvão é proveniente de plantios florestais, árvores mortas por perturbações, resíduos da colheita (casca, galhos e folhas), desbastes, podas e do processamento industrial (FERREIRA et al., 2018).

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, prevê o incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, com a recuperação e o aproveitamento energético, fortalecendo a implementação do conceito de economia circular e bioeconomia.

No Brasil, a principal fonte de madeira para a produção de carvão vegetal era proveniente de florestas nativas. Porém, com o aumento das exigências impostas pelas legislações ambientais e a preocupação com a sustentabilidade dos processos de produção de energia a partir da biomassa, as florestas plantadas e os resíduos da indústria da base florestal passaram a ser as principais fontes de matéria prima. Isso contribui com o aumento da renda, agrega valor a produtos e colabora para a conservação da biodiversidade (JESUS et al., 2017; HILLING al., 2018).

A atividade florestal na Amazônia gera grandes quantidades de resíduos, principalmente durante a colheita (9 - 18 %) e no processo de beneficiamento das toras (45 – 55 %) (NUMAZAWA et al., 2017). Em 2010, cerca de 1,6 milhão de m<sup>3</sup> de resíduos do processamento mecânico das toras foi destinado à produção de carvão vegetal e outros 2,7 milhões de m<sup>3</sup> para a geração direta de energia (PEREIRA, 2010).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (BRASIL, 2018) a Região Amazônica apresenta grande potencial de utilização dos resíduos do manejo florestal sustentável. Com isso, viabiliza a exploração florestal otimizando o aproveitamento da madeira, inclusive com a utilização dos resíduos em sistemas de produção de carvão vegetal ou uso como fonte primária de produção de energia, contemplando a sustentabilidade dos recursos naturais.

O carvão vegetal está presente em inúmeras e distintas atividades desenvolvidas em nosso cotidiano, seja nas residências no preparo de um churrasco, na indústria farmacêutica, na indústria química como: carbono, grafite, filtros e principalmente, nas indústrias siderúrgicas, usado como gerador de energia e redutor de minério (SMITH et al., 2019).

No entanto, a tecnologia utilizada para a produção de carvão vegetal na região Norte do Brasil é considerada obsoleta. Em geral, são utilizados fornos de alvenaria onde não se permite o controle adequado dos parâmetros do processo, elevando a dificuldade para se obter produtos com qualidade homogênea (OLIVEIRA et al., 2019).

Na produção de carvão vegetal em fornos de alvenaria, o controle da carbonização depende fundamentalmente do conhecimento do operador, que se baseia em fatores subjetivos, como colorações da fumaça e temperatura das paredes sentida pelo tato das mãos (BUSTAMANTE-GARCÍA et al., 2013).

Além do baixo nível tecnológico empregado, a heterogeneidade das espécies é fator que interfere na homogeneização do processo de carbonização, podendo encontrar no final do processo a madeira mal carbonizada, conhecida como “tiço”, apresentando assim, um gasto energético em um produto que não poderá ser utilizado.

Com isso, forma-se uma lacuna de informações acerca dos parâmetros ideais de carbonização dos resíduos oriundos de espécies tropicais, que dificulta a operação dos fornos, consequentemente, na qualidade do produto.

Portanto, conhecer e entender a interação entre esses fatores é uma lacuna que necessita ser preenchida para tornar mais eficiente o aproveitamento energético dos resíduos gerados na atividade florestal.

### 1.1. JUSTIFICATIVA

O manejo sustentável da floresta Amazônica é de grande importância para a conservação do bioma, através da utilização racional dos seus recursos, sem levar a

total destruição da mesma, minimizando os impactos ecológicos. Uma alternativa de atividade florestal sustentável é o aproveitamento dos resíduos do manejo florestal e do processamento mecânico da madeira (BRAZ et al. 2014). Segundo Baggio e Carpanezzi (1995) o conhecimento da quantidade e da qualidade dos resíduos florestais permite avaliar o seu potencial de aproveitamento.

Para exemplificar o quanto é elevado o desperdício de madeira, um estudo realizado pelo IMAZON (2010), registraram que no ano de 2009 foi processado 14,2 milhões de metros cúbicos de madeira em tora, o que resultou na produção de 5,8 milhões de metros cúbicos de madeira processada. A maioria (72%) dessa produção era madeira serrada com baixo valor agregado, os outros 15% foram transformados em madeira beneficiada com algum grau de agregação de valor, o restante (13%), em madeira laminada e compensada. Isso representou um rendimento médio de processamento de 41%. Os outros 8,4 milhões de madeira em tora foram categorizados como os resíduos do processamento. Desse total, cerca de 1,6 milhão de metros cúbicos desses resíduos foram aproveitados na produção de carvão, outros 2,7 milhões, na geração de energia, e 2,0 milhões, em usos diversos. Os 2,1 milhões restantes foram considerados resíduos sem nenhum aproveitamento, os quais foram queimados ou abandonados como entulho.

O Brasil possui uma das maiores reservas mundiais de minério de ferro, é um dos poucos países no mundo a manter uma siderurgia com base no carvão vegetal como redutor. Pesquisas desenvolvidas para esses setores trouxeram inúmeros avanços tecnológicos, porém, poucos estudos se dedicaram ao uso das tecnologias voltadas para a produção de carvão vegetal.

A grande dificuldade encontrada por esses consumidores está relacionada a heterogeneidade do produto, devido à falta de domínio das variáveis do processo de produção florestal e de carbonização, o que resulta em produtos com qualidades diferenciadas. Estudos apontam que a qualidade do carvão vegetal almejada pela siderurgia possui relação direta com as características intrínsecas da madeira e do controle do processo de carbonização (SANTOS et al., 2011; CARNEIRO et al., 2011).

Quando destinado à siderurgia, é desejável madeiras que possuam elevado valor de densidade, alta concentração de lignina e de extrativos, baixo teor de minerais e fibras com parede celular mais espessa e de menor largura, para garantir elevado rendimento dos carvões produzidos (NEVES et al., 2011).



Com relação ao processo de produção, fatores como a temperatura, taxa de aquecimento e pressão são os que exigem maior controle e monitoramento (ARRUDA et al., 2011; VIEIRA et al., 2013; PICANCIO et al., 2018). Estas características, por sua vez, são afetadas por diferentes fatores como, espécie utilizada, ambiente e idade (ASSIS et al., 2012).

A compreensão das etapas e dos fenômenos que ocorrem com a madeira durante o processo de carbonização irá contribuir, decididamente, para embasar qualquer tipo de modificação que se queira introduzir no processo de pirólise.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.3. OBJETIVO GERAL

O principal objetivo do trabalho foi avaliar o rendimento de conversão da madeira em carvão e a qualidade do carvão vegetal direcionado à indústria siderúrgica, testando diferentes grupos de resíduos do manejo florestal sustentável, organizados segundo a densidade básica da madeira no processo de pirólise (carbonização).

### 1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar o agrupamento de resíduos do manejo florestal em função da densidade básica da madeira;

Produzir carvão vegetal com agrupamento das espécies em função da densidade básica da madeira utilizando dois ciclos de carbonização, 10 e 12 dias;

Avaliar o efeito da densidade básica da madeira e do ciclo de carbonização no rendimento do sistema de carbonização (rendimento gravimétrico);

Analisar a influência da densidade básica da madeira e do ciclo de carbonização nas propriedades físicas, mecânicas, químicas, energéticas e térmicas do carvão vegetal (densidade à granel, densidade básica, friabilidade, teor umidade, materiais voláteis, carbono fixo, cinzas, poder calorífico superior, carbono, nitrogênio, hidrogênio e análise termogravimétrica).

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. CONTEXTO ENERGÉTICO

A região amazônica destaca-se por sua vasta biodiversidade e pelo manejo florestal sustentável que contribui para o abastecimento de madeira serrada no país. No entanto, grandes quantidades de resíduos são geradas durante a atividade de colheita (9%-18%) e no processo de beneficiamento das toras (45-55%) (Numazawa et al., 2017), que por sua vez, podem ser aproveitados na atividade de carvoejamento e produção de bioenergia.

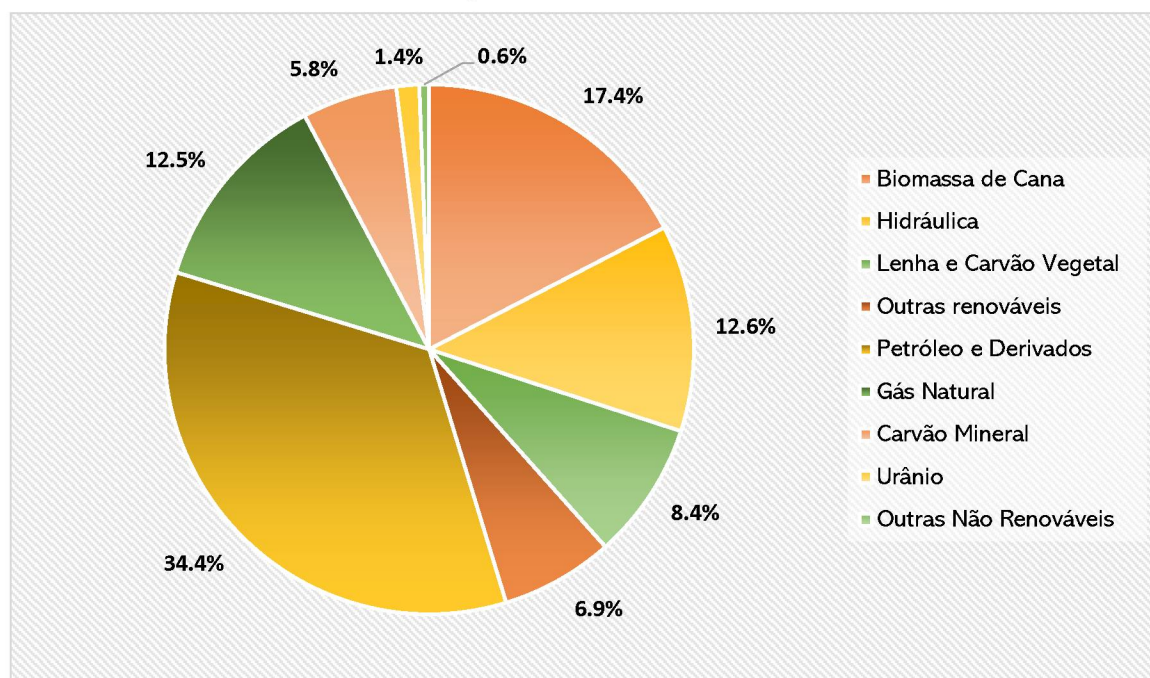
A biomassa florestal é todo material orgânico e de origem vegetal (BRAND, 2010). Atualmente utilizada para produção de energia é proveniente de diferentes partes do indivíduo arbóreo ou de seu processamento, tais como: árvores em idade de colheita ou árvores mortas por perturbações, desbaste ou podas, resíduos de exploração, subprodutos da silvicultura e processos florestais ou de florestas energéticas (FERREIRA et al., 2018).

O aproveitamento energético da madeira e dos coprodutos florestais tem se destacado nos últimos anos tanto em âmbito nacional quanto internacional, por se caracterizar como uma fonte de energia em potencial limpa e renovável além de conseguir atender as demandas do setor industrial, agrícola e doméstico (OLIVEIRA, 2020).

A biomassa florestal se destaca como fonte de energia limpa e renovável, sendo indispensável para o suprimento energético de grande parte dos processos industriais devido ao baixo custo comparado às fontes fósseis. E por essas características intensificou-se o conceito de florestas energéticas, ou seja, plantios florestais destinados para a utilização da biomassa como fonte de energia (OLIVEIRA, 2019).

Segundo dados do Balanço Energético Nacional, em 2018, a repartição da oferta de energia elétrica interna brasileira apresenta 54,7 % de fontes não renováveis e 45,3 % de fontes renováveis (EPE, 2019) (FIGURA 1).

FIGURA 1 – REPARTIÇÃO DA OFERTA INTERNA DE ENERGIA



FONTE: Adaptado de EPE, (2019).

A biomassa pode ser convertida em inúmeros combustíveis líquidos, sólidos ou gasosos por meio de rotas termoquímicas e bioquímicas, mecânicas ou de conciliação destas (BRIDGWATER, 2006). Os dois processos mais empregados para o uso da energia da madeira no Brasil são: a combustão direta, para a geração de calor, e a pirólise lenta, para a produção de carvão vegetal.

A combustão completa é considerada a forma mais simples de uso energético da madeira e consiste na oxidação dos principais elementos químicos combustíveis (Carbono e Hidrogênio) (BRAND, 2010). É uma reação exotérmica, ou seja, ocorre liberação de energia térmica. Dessa forma, o calor liberado pode ser destinado à cocção de alimentos, aquecimento, secagem de grãos ou para produção de vapor em caldeiras e, conseqüentemente, geração de eletricidade.

A carbonização ou pirólise da madeira, é outro processo termoquímico de conversão energética da biomassa, que consiste na degradação térmica dos componentes químicos macromoleculares (hemiceluloses, celulose e lignina) na presença controlada ou ausência de oxigênio, em temperaturas acima de 300 °C, tendo como objetivo a obtenção de um combustível sólido com maior concentração de carbono (BRAND, 2010).

Em siderúrgicas, o carvão vegetal é utilizado como fonte de energia, agente redutor do minério de ferro, o qual é a matéria-prima essencial para a produção de

ferro-gusa, que por sua vez é utilizado na produção de aço (SILVA, MATHIAS, BAJAY 2018).

Portanto, tendo em vista a relevância do uso da biomassa florestal para conversão energética, justifica a necessidade de estudos capazes de disponibilizar, para o setor florestal brasileiro, técnicas mais eficazes e econômicas, que visem à otimização da cadeia produtiva do carvão vegetal.

## 2.2. CINÉTICA DA CARBONIZAÇÃO

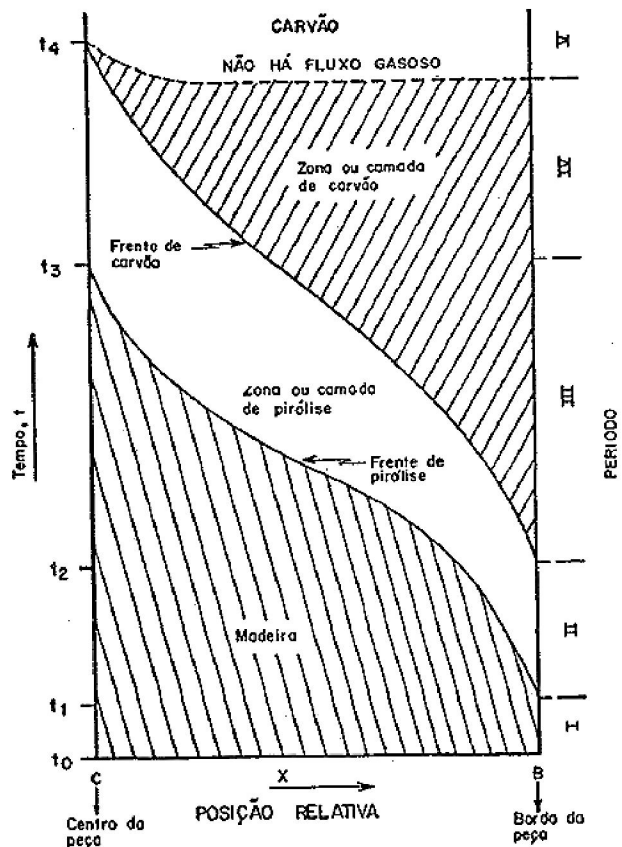
A carbonização é definida como um processo físico-químico, em que a biomassa é aquecida em temperaturas acima de 300 °C, na presença controlada ou na ausência do oxigênio, durante um período relativamente longo, promovendo modificações dos seus componentes (extrativos, hemiceluloses, celulose e lignina), cujo objetivo é aumentar o teor de carbono na massa resultante do processo, o carvão vegetal (ERNSTING et al., 2015).

Durante o processo são gerados três tipos de produtos, gases não condensáveis ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}$ ), líquidos (alcatrões, ácido acético, álcool metílico e outros) e sólido (carvão vegetal), sendo estes potencialmente energéticos (ROUSSET et al., 2011).

De maneira simplificada, a carbonização tem como objetivo concentrar carbono e expulsar oxigênio, como consequência aumentar o conteúdo energético no produto. De acordo com Brand (2010), a madeira apresenta uma média de carbono e oxigênio de 49 % e 44 %, respectivamente, com a carbonização desse material, esses valores passam para uma média de 82 % para a concentração de carbono e 13 % para o conteúdo de oxigênio.

O modelo desenvolvido por Kanury e Blackshear, Figura 2, para explicar as formas de transferência de calor durante a carbonização, pode ser uma ajuda para a compreensão qualitativa do processo de carbonização.

FIGURA 2 – MODELO DE CARBONIZAÇÃO DE KANURY E BLACKSHEAR



FONTE: MODELO DE CARBONIZAÇÃO DE KANURY e BLACKSHEAR (1970).

A temperatura da peça de madeira irá aumentar gradativamente com o aumento do seu tempo de exposição ao calor. Durante o seu aquecimento serão identificados 5 diferentes espaços de tempo, os quais darão origem a 5 diferentes etapas ou períodos do processo de carbonização, conforme KANURY e BLACKSHEAR (1970).

Fase I. A madeira ainda não sofre transformações e o calor é transferido da borda para o interior da peça por condução.

Fase II. A transformação da madeira é iniciada da borda para o centro da peça. Com o decorrer do tempo de exposição ao calor a zona ou camada de pirólise formada nesta fase avançará para o interior da peça. Os gases formados na zona de pirólise transportam calor para o exterior (convecção) em direção ao calor transferido do meio externo, que ocorre por condução.

Fase III. Nesta fase inicia-se a formação de carvão e sua característica é a coexistência de uma região de madeira que ainda não sofreu transformações, uma



zona de pirólise e carvão. Os gases pesados formados durante a carbonização sofrem uma decomposição catalisada pelo leito de carvão. Os gases mais leves assim formados ao atingir a superfície da peça reagem com o oxigênio produzindo uma reação de combustão;

Fase IV. Caracterizada pelo desaparecimento da madeira em seu estado natural e pela coexistência da zona de pirolise com o carvão vegetal.

Fase V. Nesta fase a frente de carvão alcança o centro da peça, tem-se a presença apenas de carvão e não há fluxo gasoso.

Deve ser ressaltado que a carbonização se processa da conjunção de dois principais fatores, temperatura e tempo. Os dois fatores devem atuar juntos para se alcançar o objetivo desejado.

### 2.3. CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA E DE SEUS COMPONENTES

O comportamento da madeira diante do processo de carbonização pode ser representado pelo somatório dos comportamentos isolados dos seus três principais componentes que são celulose, hemiceluloses e lignina. Embora tenha sido detectada uma pequena interação quando estes componentes estão juntos, os efeitos as vezes podem ser considerados quase desprezíveis e o estudo de cada um separadamente representa uma boa aproximação do fenômeno como todo. A proporção de cada um desses componentes é apresentada na Tabela 1.

TABELA 1 – PROPORÇÃO MÉDIA DA CELULOSE, HEMICELULOSE, LIGNINA E EXTRATIVOS NA MADEIRA.

Componente	Coníferas	Folhosas
Celulose	42 ± 2%	45 ± 2%
Hemicelulose	27 ± 2%	30 ± 5%
Lignina	28 ± 2%	20 ± 4%
Extrativos	5 ± 3%	3 ± 2%

FONTE: Adaptado de Oliveira et al., (1982).

Esses componentes da madeira podem sofrer uma variação, ocorrendo em proporções diferentes conforme seja a madeira: folhosas ou coníferas, juvenil ou adulta, mais densa ou menos densa e em diferentes espécies.

A hemicelulose é um polissacarídeo de estrutura primária, apresenta diferentes tipos de monossacarídeos (hexoses, pentoses) (FENGEL; WENEGER, 1984). Segundo Oliveira (2003) e Neves et al. (2011), as ramificações presentes na estrutura lhe causam instabilidade. Na madeira, a hemicelulose está presente com porcentagens de 15-25%. (ROWELL, 2005).

A estrutura química da hemicelulose influencia diretamente nos processos de degradação. Sua decomposição inicia-se em temperaturas de aproximadamente 260 °C, e finalizam-se próximo à 290 °C. (ÓRFÃO; FIGUEREDO, 2001).

A celulose é constituída por unidades de D-Glicopirranose, interligadas por ligações glicosídicas  $\beta$  1-4 e sua porcentagem na madeira corresponde de 40-45%. (ROWELL, 2005). A faixa de degradação da celulose ocorre entre 200 - 280 °C, e ocorre em três estágios, vigorosa decomposição, decomposição continua e evolução dos produtos voláteis (ROFFAEL; SCHALLER, 1971; OLIVEIRA et al., 1982).

A lignina, é um constituinte de alta complexidade, corresponde entre 18-25% em árvores folhosas e de 25-35% nas coníferas (ROWELL, 2005). A degradação da lignina ocorre em faixas de temperaturas entre 400-470°C, porém, é possível verificar alteração na estrutura em temperaturas mais baixas (150°C) (OLIVEIRA et al., 1982, BARRICHELO; BRITO, 1985).

O teor de lignina apresenta relação positiva e linear entre a produção energética e o poder calorífico, significando que quanto maior for o teor de lignina, maior será o poder calorífico. (DEMIRBAS, 2001).

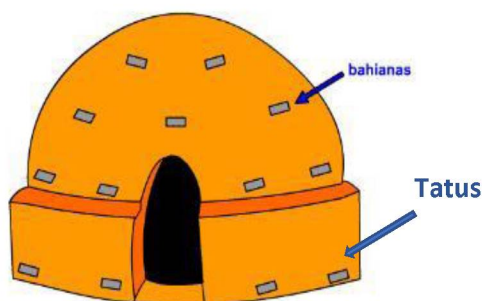
## 2.4. TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

### 2.4.1. Forno rabo-quente

Estes são os tipos de fornos mais utilizados no Brasil para a produção de carvão vegetal. São construídos em alvenaria, sendo tijolos assentados com barro. Apresentam baixo custo de construção, rendimento razoável e são de fácil operação (PINHEIRO et al., 2006).

Em forma semiesférica, com uma única porta e sem chaminé. O diâmetro da base pode medir 3 a 7 metros e altura média de 3,5 m. O controle da entrada de ar para a carbonização é feito por orifícios distribuídos em torno do forno, chamados de tatus, localizados ao nível do piso (FIGURA 3) (CETEC, 1982).

FIGURA 3 - MODELO DO FORNO RABO-QUENTE.



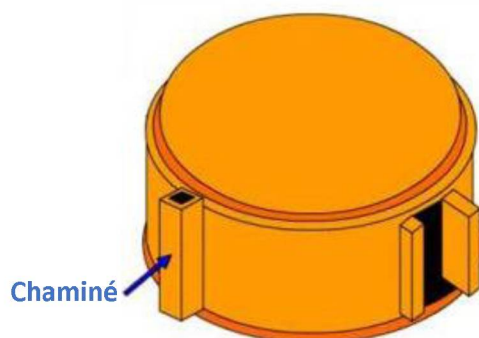
FONTE: CETEC, (1982).

A saída dos gases ocorre através de aberturas distribuídas na superfície do forno, denominadas de filas ou baianas. O enchimento desse tipo de forno é de forma manual e o ciclo de carbonização varia de 7 a 10 dias, de acordo com a umidade do material utilizado para a produção de carvão vegetal (CETEC, (1982). É o mais difundido dos fornos de carbonização, pelo seu baixo custo de instalação.

#### 2.4.2. Forno de superfície colmeia

Forno construído com tijolos, maciços, fechado no topo por uma cúpula semiesférica. Apresenta duas portas, uma para entrada da lenha e outra para o descarregamento do carvão vegetal (FIGURA 4). Apresenta ainda uma chaminé lateral com tiragem central, que melhora o fluxo dos gases e as condições térmicas do forno. Suas dimensões variam de 3 a 8 m de diâmetro na base e de 2 a 5 m de altura, com capacidade de 36 st/lenha\*. Normalmente, este forno é utilizado por empresas de reflorestamento próprio. É um forno resistente, de fácil manutenção e operação (PINHEIRO et al., 2006).

FIGURA 4 - MODELO DO FORNO COLMEIA.



FONTE: CETEC, (1982).

O forno tem capacidade média de 36 estéreo\* de lenha (seca ao ar com aproximadamente 25 % de umidade), produz em média 20 m<sup>3</sup> de carvão, operando com um índice de conversão lenha/carvão = 1,8 st/lenha\*. A operação completa (carregamento, carbonização, resfriamento e descarga) demanda 10 dias. Cada forno produz em média 60 m<sup>3</sup> de carvão/mês e sua vida útil é de 4 anos (CETC, 1982).

#### 2.4.3. Forno caieira

Bastante similares aos fornos do tipo “rabo quente”, são construídos recostados em um barranco ou ainda construídos em uma vala no chão, estes últimos sendo fechados usualmente com terra (FIGURA 5).

Seu diâmetro varia entre 3 e 4 metros e sua altura entre 2,5 e 3 metros. Apesar de precisar de menos tijolos para sua construção, requer mais mão de obra, utilizada para escavar o terreno. Sua principal desvantagem é que só pode ser construído em terrenos firmes e acidentados (PINHEIRO et al., 2006). Além disso, apresenta baixa capacidade de carga e lento resfriamento, causando atraso na venda do produto (MENDES et al., 1982).

\*St/lenha: Unidade de medida, equivalente ao metro cúbico, usada para medir o volume da lenha empilhada.

FIGURA 5 - MODELO DO FORNO CAIEIRA.



FONTE: O autor (2020).

#### 2.4.4. Forno metálico

Os fornos metálicos (FIGURA 6), de diferentes formas e tamanhos, têm a vantagem de serem móveis, podendo sempre ser instalados próximos às áreas de corte de madeira. Têm a desvantagem de perder muito calor pelas paredes, proporcionando baixos rendimentos, comparados aos fornos de alvenaria (PINHEIRO et al., 2006).

FIGURA 6 - MODELO DO FORNO METÁLICO.



FONTE: O autor (2020).

Na tentativa de melhorar os métodos tradicionais de produção do carvão vegetal, os fornos metálicos vêm sendo aperfeiçoados visando o alcance de resultados em termos de redução do tempo de carbonização, aumento nos



rendimentos, aproveitamento dos subprodutos do processo, diminuição dos custos logísticos (DONATO et al., 2017).

Este tipo de forno possui capacidade média de 4,6 m<sup>3</sup>, com ciclo de carbonização de 16 horas. É muito aconselhado para a carbonização de resíduos de madeira, tanto provenientes da exploração florestal, quanto provenientes da indústria, como serrarias e carpintarias (NOGUEIRA; LORA, 2003; DONATO et al., 2017).

#### 2.4.5. Fornos retangulares

Os fornos retangulares que continuaram a ser construídos com tijolo maciço cerâmico, porém a grande capacidade volumétrica desses fornos possibilitou a mecanização das operações de carregamento e descarregamento, tornando necessária a construção dos fornos numa mesma unidade de produção de carvão vegetal (OLIVEIRA, 2012) (FIGURA 7).

FIGURA 7 - MODELO DO FORNO RETANGULAR.



FONTE: Empresa VIENA SIDERÚRGICA S.A.

Os fornos retangulares apresentam rendimento gravimétrico em carvão vegetal variando de 30 a 35%, mas, visando ao aumento da produtividade dos fornos e melhoria da qualidade e homogeneidade do carvão, o controle da carbonização tem sido executado pelo monitoramento da temperatura interna do forno, através de sensores infravermelhos ou sistema supervisório, conforme atestado por Arruda et al., (2011) e Carvalho et al., (2012)

O tempo médio de carbonização da madeira nos fornos retangulares é de quatro dias, enquanto o resfriamento pode durar de 8 a 14 dias. O tempo de resfriamento depende da geometria do forno, de suas dimensões, do material usado na sua construção e da massa de carvão produzida, entre outros (FRANÇA e CAMPOS, 2002).

#### 2.4.6. Fornos container

A Empresa Rima Industrial S/A (MG), produtora de ferros silício e manganês, vem investindo, desde 2001, em pesquisa e desenvolvimento de fornos cilíndricos metálicos de carbonização, batizados de Fornos Container Rima (FCR) (FIGURA 8).

FIGURA 8- MODELO DO FORNO CONTAINER.



FONTE: Empresa RIMA.

A primeira versão do forno FCR teve início em 2001. Com capacidade de processamento de 5 m<sup>3</sup> por fornada, apresentava produtividade baixa de 5 kg/h e rendimento gravimétrico (RG) variando entre 25 e 28%. A segunda versão operou em 2005 e triplicou a produtividade, alcançando 15 kg/h e melhorando o RG para a faixa de 28 a 31%. A terceira versão atingiu 30 kg/h e RG de 33%. Com estudos de otimização e modelamento matemático do processo, melhoria da engenharia do piloto, a quarta versão do FCR passou para a capacidade industrial de 40 m<sup>3</sup> e uma produtividade de 700 kg/h e RG = 35%.

O forno FCR é constituído de cilindro metálico que, atualmente, carboniza cavacos de madeira. A energia necessária para o processo é obtida da queima das fumaças no interior do forno. Como o processo ocorre com elevada taxa de aquecimento, há a predominância da gaseificação que queima com mais facilidade

que a madeira sólida. O modelo atual com capacidade para 40 m<sup>3</sup> de madeira apresenta alta produtividade, chegando a 700 kg/h. Como comparação, os maiores fornos de alvenaria atuais em operação produzem 200 kg/h.

## 2.5. QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL PARA USO EM ALTO-FORNO

Em um alto forno, os processos de transformação do minério de ferro em ferro gusa são complexos e de difícil modelagem matemática uma vez que o modelo deve captar as interações entre sólido, líquidos e gases, que ocorrem no interior do equipamento (BARCELLOS, 2007).

O carvão vegetal é considerado um dos melhores redutores para uso siderúrgico, apresentando maior pureza em relação ao carvão mineral, um baixo teor de enxofre e cinzas (TRUGILHO et al., 2015). Vários parâmetros são utilizados para avaliar a qualidade do carvão vegetal.

A produção e qualidade do carvão vegetal são influenciadas diretamente pelo material de origem e pelo sistema adotado na transformação. Em relação as propriedades do carvão vegetal podem-se destacar a composição química, densidade, granulometria e friabilidade.

A densidade básica é a relação entre a massa absolutamente seca da madeira pelo volume verde ou saturado, sendo expressa em g.cm<sup>-3</sup> ou kg.m<sup>-3</sup>. Brito e Barrichelo (1980), mostraram que a densidade básica da madeira e a densidade do carvão possuem uma forte correlação (0,97). Assim, quanto maior a densidade da madeira maior será a densidade relativa aparente do carvão vegetal produzido e, conseqüentemente, maior será a produção em massa em carvão vegetal, para um determinado volume de madeira enforada.

Este fato evidencia a importância da densidade básica da madeira, tornando-a um considerável parâmetro na escolha de matérias – primas, destinadas à produção de carvão vegetal. Para Trugilho e Silva (2001), a densidade básica é a propriedade física de maior atuação, na qualidade do carvão, pois está associada com diversas outras propriedades da madeira e interfere, de forma significativa, na qualidade de seus derivados.

O uso de madeiras de altas densidades, para fins energéticos, apresenta as seguintes vantagens: a) maior rendimento energético no transporte; b) menor área de estocagem e manuseio da madeira; c) maior rendimento das caldeiras para queima



direta da madeira; d) maior rendimento dos reatores para hidrólise ácida (PEREIRA et al., 2000).

Em árvores mais adultas e maduras, de maneira geral, uma elevada densidade apresentará uma composição química mais estável. Pereira, Schaitza e Baggio (2000), observaram que essa relação de maior densidade e maior teor de lignina apontará para um carvão com melhor qualidade, exibindo alto rendimento gravimétrico, aumento no teor de carbono fixo e densidade aparente do carvão.

O conhecimento da composição química imediata, principalmente do teor de carbono fixo, é importante pois, este teor reflete a utilização do forno por unidade de volume. Considerando-se um determinado alto forno e as mesmas condições operacionais, à medida que se aumenta o teor de carbono fixo do carvão, maior será a utilização volumétrica do alto-forno (MATOS, 1976; BARCELLOS, 2007; BRAND, 2010).

A resistência mecânica do carvão é de máxima importância, devido as numerosas operações de manuseio e transporte durante o seu trajeto dos fornos de carbonização até aos altos-fornos.

A friabilidade, ou seja, a maior ou menor resistência do carvão vegetal à geração de finos está relacionada basicamente com as características da madeira antes da carbonização e alguns parâmetros utilizados na carbonização, a saber: umidade, diâmetro e comprimento das peças de madeira, temperatura de carbonização e taxa de aquecimento (BOTREL et al., 2007).

Conforme Picancio et al., (2018) as frações mais finas do carvão no alto-forno é que fazem cair sensivelmente a temperatura do leito, o que irá aumentar, consideravelmente, as quedas de pressão no mesmo. Assim, faz-se necessário o peneiramento das matérias-primas antes de seu carregamento no equipamento de redução.

Na Tabela 6 podemos verificar os valores aconselhados de algumas propriedades do carvão vegetal direcionado a siderurgia.

TABELA 6 - PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL PARA USO SIDERÚRGICO.

	<b>Carvão Vegetal</b>
Densidade básica (g.cm <sup>-3</sup> )	> 0,35
Umidade (%)	< 10
Rendimento gravimétrico (%)	> 30
Friabilidade (%)	< 10
Teor de carbono fixo (%)	> 80
Teor de cinzas (%)	< 1,5
Teor de materiais voláteis (%)	< 23,5
Poder calorífico (kcal cal)	> 7,000

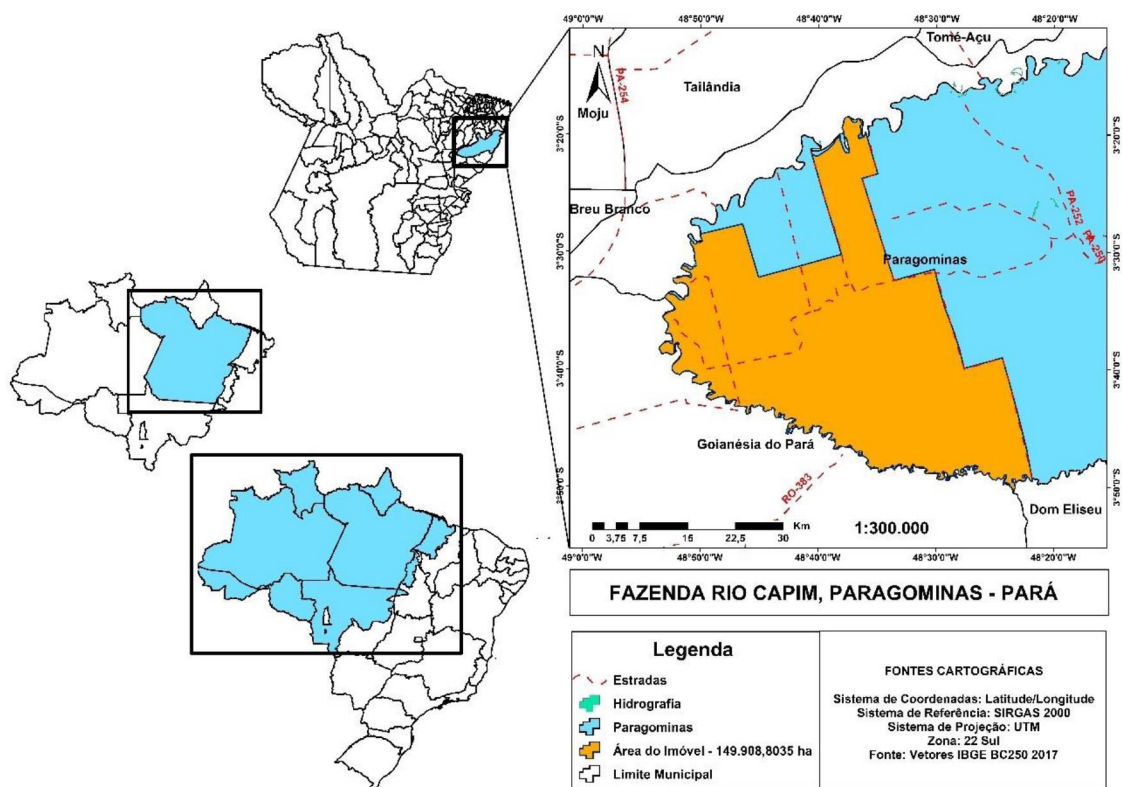
FONTE: CTFT, (1972); BARCELOS, (2007); CGGE, (2008); SOUZA et., (2016).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. ÁREA DE ESTUDO

O estudo de carbonização foi realizado na carvoaria da Fazenda Rio Capim, localizada no município de Paragominas, Estado do Pará, pertencente a empresa Cikel Brasil Verde Madeiras Ltda (FIGURA 9).

FIGURA 9 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA FAZENDA RIO CAPIM, PARAGOMINAS, PARÁ, BRASIL.



FONTE: O autor (2020).

O município de Paragominas pertence à Mesorregião Sudeste Paraense e à Microrregião de Paragominas (PARÁ, 2011). Possui uma área territorial de aproximadamente 20.000 km<sup>2</sup>. A principal atividade econômica é o setor florestal devido as suas extensas florestas naturais e de reflorestamentos, seguido de plantios agrícolas de soja e milho (PINTO et al., 2009).

O clima do município de Paragominas é do tipo mesotérmico e úmido. A temperatura média anual é elevada, em torno de 25 °C. O período mais quente, com médias mensais em torno de 25,5 °C, coincide com os meses de primavera no

hemisfério Sul, e as temperaturas mínimas diárias de 20 °C, ocorrem nos meses de inverno no referido hemisfério (junho a agosto). Seu regime pluviométrico fica, geralmente, entre 2.250 mm e 2.500 mm anuais (PARÁ, 2011).

Os principais polos madeireiros no Estado do Pará quanto ao número de madeireiras são Paragominas (155 empresas), Tomé-Açu (52), Jacundá (50), Tailândia (44) e Breu Branco (40). Os menores polos são Afuá e Portel (6 empresas cada), Uruará (7) e Novo Repartimento (9) (IMAZON, 2012).

Sua posição geográfica é considerada estratégica e confere vantagens devido a facilidade de escoamento da produção através da rodovia Belém-Brasília (BR-010) e o porto de Vila do Conde no Pará. Porto brasileiro mais próximo em milhas náuticas dos mercados consumidores da Europa, Estados Unidos e Caribe (LENTINI, VERÍSSIMO, SOBRAL, 2003).

### 3.2. SELEÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DAS ESPÉCIES

A matéria-prima utilizada no estudo foi proveniente da área sob o regime do plano de manejo florestal e consistiu em resíduos de exploração florestal (galhos, sapopemas, toras ocas ou rachadas e aparas) (FIGURA10).

FIGURA 10 – RESÍDUOS FLORESTAIS UTILIZADOS NO ESTUDO.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

FONTE: O autor (2020)

LEGENDA: (a) = galhos de árvores, (b) = árvores rachadas, (c) = sapopemas, (d) = árvores ocas, (e) = pátio de resíduos.

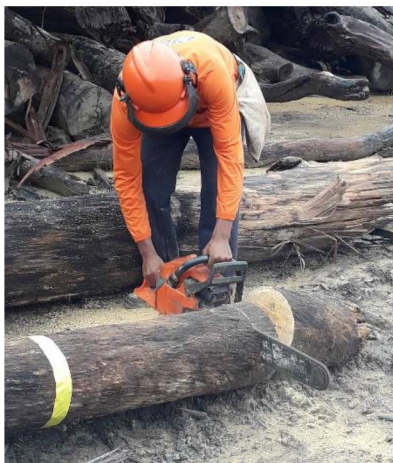


Primeiramente, os resíduos foram identificados por um parataxonomista e em seguida foram coletados discos de madeira, com aproximadamente 5 cm de espessura. Posteriormente, foram preparados cinco corpos de provas com dimensões de 5 x 5 x 10 cm para a determinação da densidade básica seguindo as recomendações das normas MB 1269/79 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (FIGURA 11).

FIGURA 11 – PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: (a)= identificação dos resíduos; (b)= coleta das amostras; (c)= discos de cada espécie; (d)= dimensionamento das peças de madeira; (e)= verificação da massa dos corpos de prova; (f)= secagem em estufa.

Após a determinação da densidade básica, densidade aparente e teor de umidade da madeira, as espécies foram classificadas em dois grupos de acordo com a densidade básica da madeira (FIGURA 12). Sendo denominados Grupo 1 as espécies com densidade básica da madeira  $\geq 750 \text{ kg.m}^{-3}$  (TABELA 3) e Grupo 2 as espécies com valor de densidade  $< 750 \text{ kg.m}^{-3}$  (TABELA 4).

TABELA 3 – AGRUPAMENTO DAS ESPÉCIES EM FUNÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA  $\geq 750 \text{ kg.m}^{-3}$

Espécie	Nome vulgar	Densidade básica ( $\text{kg.m}^3$ )
<i>Manilkara amazonica</i> (Huber) A. Chev.	Maçaranduba	940
<i>Dinizia excelsa</i> Ducke	Angelim vermelho	868
<i>Chrysophyllum venezuelanense</i> Pierre T.D.Penn	Guajara cinza	907
<i>Diploptropis racemosa</i> (Hoehne) Amshoff	Sucupira de pele de sapo	870
<i>Vatairea paraensis</i> Ducke	Angelim amargoso	827
<i>Peltogyne venosa</i> (Vahl) Benth	Roxinho	844
<i>Cenostigma macrophyllum</i> Tul	Pau canela	1158
<i>Pouteria macrophylla</i> (Lam.) Eyma	Tuturuba	901
<i>Dalbergia melanoxylon</i> Guill. et Perr.	Pau preto	1140
<i>Chrysophyllum amazonicum</i> T.D. Penn.	Casca seca	830
<b>Média</b>		<b>929</b>

FONTE: O autor (2020).

TABELA 4 – AGRUPAMENTO DAS ESPÉCIES EM FUNÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA  $< 750 \text{ kg.m}^{-3}$

Espécie	Nome vulgar	Densidade básica ( $\text{kg.m}^3$ )
<i>Parkia pendula</i> (Willd.) Benth. ex Walp.	Faveira	320
<i>Caryocar coccineum</i> Pilg.	Piqui	730
<i>Tachigali myrmecophila</i> Ducke	Taxi	628
<i>Couratari</i> spp	Estopeiro	470
<i>Alexa grandiflora</i> Ducke	Melancieiro	643
<i>Pouteria pentasperma</i> (Standl.) Baehni	Guajara bolacha	564
<i>Brosimum parinarioides</i> Ducke	Amapá	590
<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.) Morong	Tamboril	510
<i>Laetia procera</i> (Poepp.) Eichler	Pau Jacaré	610
<i>Pouteria anomala</i> (Pires) T.D.Penn.	Abiurana rosadinha	730
<b>Média</b>		<b>580</b>

FONTE: O autor (2020).

FIGURA 12 – GRUPOS DE RESÍDUOS FLORESTAIS AGRUPADOS DE ACORDO COM DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA.



(a)



(b)

FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: (a)=  $G1 \geq 750 \text{ kg.m}^{-3}$ , (b)=  $G2 < 750 \text{ kg.m}^{-3}$ .

### 3.3. PROCESSO DE CARBONIZAÇÃO

A empresa possui um complexo de carbonização, operando com 600 fornos de produção de carvão vegetal, subdivido em duas UPC (unidade de produção de carvão) com 300 fornos cada. Toda produção da empresa é direcionada para as indústrias siderúrgicas na região Norte do Brasil (FIGURA 13).



FIGURA 13 – COMPLEXO DE PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL, FAZENDA RIO CAPIM, PARAGOMINAS, PARÁ, BRASIL.



(a)



(b)

FONTE: Autor (2020)

LEGENDA: (a)= Unidade de produção de carvão vegetal 1, (b) unidade de produção de carvão vegetal 2.

A empresa utiliza na sua linha de produção fornos de alvenaria, conhecidos como “rabo-quente”. Este tipo de forno possui forma semiesférica, com 4 metros de diâmetro, 2 metros de altura, com volumetria média de  $16 \text{ m}^3$ . Apresenta duas portas para carregamento e descarregamento de material, de 1,60 metros de altura e 0,90 m de comprimento. Na parte superior possui 4 aberturas denominadas de “baianas” e na parte inferior 4 aberturas chamadas de “tatus”, sendo estas, utilizadas para controlar a entrada de oxigênio no forno. Na parte lateral possui uma chaminé, com 0,40 cm de comprimento e 1 m de altura (FIGURA 14).

FIGURA 14 – FORNO RABO QUENTE UTILIZADO NA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL.



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: (a)= Parte frontal do forno rabo quente, (b) Parte traseira do forno rabo quente.

### 3.4. PREPARAÇÃO DOS RESÍDUOS PARA PROCESSO DE CARBONIZAÇÃO

Após a identificação das espécies e realizado o agrupamento de acordo com a densidade básica da madeira, os resíduos foram traçados com uma altura média de 50 cm, utilizando uma escavadeira com o cabeçote de *Harvester* (FIGURA 15).

FIGURA 15 – PREPARAÇÃO DOS RESÍDUOS PARA O PROCESSO DE CARBONIZAÇÃO.



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: (a)= Traçamento dos resíduos; (b)= Pilha de resíduos traçados.



### 3.5. DETERMINAÇÃO DA MASSA DOS RESÍDUOS E ENCHIMENTO DOS FORNOS

Para a determinação da massa dos resíduos enforados, foi utilizado um veículo, (6,340 t vazio) para medir a quantidade de massa necessária para o enchimento dos fornos utilizados (FIGURA 16).

FIGURA 16 - DETERMINAÇÃO DA MASSA DOS RESÍDUOS ENFORNADOS.



(a)



(b)

FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: (a)= Determinação da massa do veículo vazio, (b)= Determinação da massa dos resíduos.

Em seguida, os resíduos foram colocados na parte frontal de cada forno para o processo de carregamento. Após o enchimento total dos fornos, o excedente de resíduos foi verificado a massa em uma balança com capacidade de 150 quilos, para o cálculo real da quantidade do material enforado (FIGURA 17).

FIGURA 17 – PROCESSO DE ENCHIMENTO DOS FORNOS.



(a)



(b)



(c)

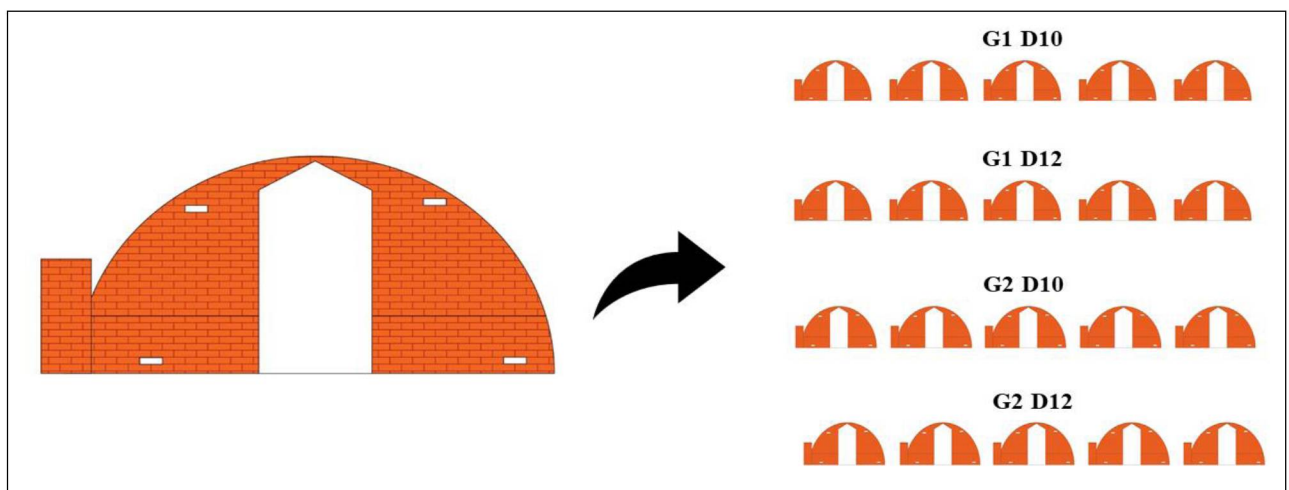
FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: (a)= Resíduos na parte frontal dos fornos para o carregamento, (b)= Massa dos resíduos excedentes, (c)= Forno com carga completa.

### 3.6. ESQUEMA DE CARBONIZAÇÃO

As carbonizações foram realizadas utilizando-se 10 fornos para cada grupo de densidade básica, com ciclo de carbonização de 10 e 12 dias, sendo 5 fornos para cada ciclo. Totalizando 20 fornos no experimento (FIGURA 18).

FIGURA 18 – LAYOUT DO ESQUEMA DE CARBONIZAÇÃO AVALIADO NO ESTUDO.



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: G1 D10 = densidade básica  $\geq 750 \text{ kg.m}^{-3}$  ciclo de 10 dias; G1 D12 = densidade básica  $\geq 750 \text{ kg.m}^{-3}$  ciclo de 12 dias; G2 D10 = densidade básica  $< 750 \text{ kg.m}^{-3}$  ciclo de 10 dias; G2 D12 = densidade básica  $< 750 \text{ kg.m}^{-3}$  ciclo de 12 dias;

### 3.7. RESFRIAMENTO E DESCARREGAMENTO DOS FORNOS

Após o processo de carbonização, os fornos foram resfriados naturalmente, através da troca de calor das paredes com o ambiente. Foi utilizada na “barrelada”, uma mistura de argila, areia e água aplicada por um equipamento, denominado “barrelador”. O barrelamento tem a função de reparar as fissuras e trincas, impedindo a entrada de ar no forno e garantir o resfriamento do forno. Foram realizadas, em média, 4 barreladas em cada forno (FIGURA 19).

FIGURA 19 – PROCESSO DE RESFRIAMENTO DOS FORNOS.



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: (a)= Processo de barrelamento, (b)= Forno barrelado.

Após o processo de carbonização todo carvão vegetal foi retirado e colocado em uma caixa de madeira (a) de massa conhecida para verificação da massa carvão produzido (FIGURA 20).



FIGURA 20 – PROCESSO DE DESCARREGAMENTO E VERIFICAÇÃO DA MASSA DO CARVÃO VEGETAL PRODUZIDO.



(a)



(b)

FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: (a)= Descarregamento do carvão vegetal, (b)= Verificação da massa do carvão vegetal produzido.

A coleta dos dados referentes à carbonização dos resíduos do manejo florestal deu-se de forma que não interferisse na rotina normal de trabalho da empresa. Este cuidado, fez-se necessário para não influenciar na produção de carvão vegetal da empresa.

### 3.8. DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO E QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL

O controle da qualidade é o primeiro passo para melhorar a eficiência do processo de carbonização, e, conseqüentemente, as características do produto. Para isso, foram realizados testes físicos, mecânico, químicos, energéticos e térmicos com o carvão vegetal produzido.

#### 3.8.1. Rendimento gravimétrico de carvão vegetal

O rendimento gravimétrico de resíduos em carvão vegetal consistiu na relação entre a massa do carvão produzido e massa da madeira enforada, para cada forno, expresso em porcentagem e calculado com auxílio da Equação 1 (OLIVEIRA et al., 2010).

$$RGC = \frac{M_{carvão}}{M_{madeira}} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

RGC - Rendimento gravimétrico (%)

M carvão - Massa do carvão produzido (t)

M madeira - Massa da madeira enforcada (t)

### 3.8.2. Densidade a granel do carvão vegetal

A densidade a granel expressa a massa de carvão contido em um recipiente de 1 m<sup>3</sup> de volume. Neste estudo, utilizou-se um recipiente com capacidade média de 0,229 m<sup>3</sup>. De cada fornada, foram tomadas amostras de carvão em cinco balaies para determinação da massa, em uma balança com capacidade de 150 kg (FIGURA 21). A densidade a granel foi calculada com auxílio da Equação 2.

$$D_{granel} = \frac{M_{carvão}}{V_{recip}} \quad (2)$$

Onde:

D granel - Densidade a granel do carvão (kg.m<sup>-3</sup>)

M carvão - Massa do carvão (kg)

V recip - Volume do recipiente (m<sup>3</sup>)

FIGURA 21 – ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE A GRANEL DO CARVÃO VEGETAL.



(a)



(b)

FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: (a) = Massa do recipiente vazio, (b) = Massa do carvão vegetal no recipiente preenchido.

Para os estudos de caracterização das propriedades do carvão vegetal, coletou-se cerca de 60 quilos de carvão de cada fornada (FIGURA 22), que foram identificadas e encaminhadas ao Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais – LTPF da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), onde foram determinadas as propriedades mecânica (friabilidade), físicas (densidades) e químicas imediatas (teor de umidade, carbono fixo, materiais voláteis e cinzas), posteriormente, no Laboratório de Nutrição Animal da Universidade Federal do Paraná (UFPR) onde foi determinado o poder calorífico superior do carvão produzido.

FIGURA 22 – AMOSTRAS DE CARVÃO VEGETAL COLETADAS PARA O ESTUDO DAS PROPRIEDADES.



FONTE: O autor (2020).

As análises térmicas foram realizadas no Laboratório de Energia da Universidade Tecnológica do Paraná (UTFPR) e a determinação da composição elementar (carbono, hidrogênio e nitrogênio) foi realizada no Departamento de Química Analítica da Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR).

### 3.8.3. Friabilidade do carvão vegetal

A propriedade mecânica do carvão (friabilidade) consistiu na capacidade do carvão resistir à formação de partículas e pó, devido ao seu manuseio e transporte. Foi determinada através do teste de tamboramento, de acordo com a Norma MB 1375/80 da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Para o teste de friabilidade, foram utilizadas amostras aleatórias de carvão de cada fornada. Utilizou-se cerca de 500 g de pedaços de carvão de forma que



passassem em uma tela com malha 5 x 5 cm e retidos na de 2 x 2 cm. Essa massa correspondeu a massa inicial do carvão ( $M_i$ ). Posteriormente, as amostras foram submetidas a esforços de choque e atrito a 30 rpm, em um tambor motorizado automático, por quinze minutos (FIGURA 23).

FIGURA 23 – ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DA FRIABILIDADE DO CARVÃO VEGETAL.



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: (a)= Amostras de carvão de cada fornada, (b)= Tambor automático utilizado no teste.

Após o tamboramento, todo carvão que ficou retido na tela com malha de 2 x 2 cm, foi verificado a massa final ( $M_f$ ) e a friabilidade foi calculada usando a Equação 3.

$$Fri = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

Fri - Friabilidade do carvão vegetal (%);

$M_i$  - Massa do carvão inicial (g);

$M_f$  - Massa do carvão final (g);

#### 3.8.4. Densidade básica do carvão vegetal

A densidade básica do carvão vegetal foi determinada pelo método hidrostático (FIGURA 24), por meio da saturação em água, conforme os preceitos da norma NBR 11941 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003). Das amostras de carvão coletadas de cada fornada, foram preparados dez corpos de prova, com

dimensões aproximada de 5 x 5 x 10 cm, para determinação da densidade básica, através da Equação 4.

$$DBC = \frac{MC(seco)}{VC(saturado)} \quad (4)$$

Onde:

DBC = Densidade básica do carvão (g.cm<sup>-3</sup>)

MC (seco) = Massa do carvão seco em estufa a 102 °C (g)

VC (saturado) = Volume do carvão saturado (cm<sup>3</sup>)

FIGURA 24 – ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA DO CARVÃO VEGETAL.



(a)



(b)

FONTE: Autor (2020).

LEGENDA: (a)= Saturação do carvão vegetal, (b)= Princípio de Arquimedes.

### 3.8.5. Análises Químicas Imediatas do carvão vegetal (umidade, voláteis, carbono fixo e cinzas)

As análises químicas imediatas do carvão vegetal se referem à determinação da porcentagem dos teores de umidade (TU), materiais voláteis (TMV), cinzas (TCZ) e carbono fixo (TCF) contidos no carvão, com base na Norma D1762/84 da *American Society for Testing and Materials* (FIGURA 25), realizado em duplicata.

FIGURA 25 – ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DA QUÍMICA IMEDIATA DO CARVÃO VEGETAL.



(a)



(b)



(c)



(d)

FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: (a)= Preparação das amostras antes do ensaio, (b)= Aferição da massa da amostra, (c)= cadinho no pré-aquecimento, (d)= Cinzas das amostras no final do ensaio.

O material utilizado foi identificado por fornada, transformado em partículas menores, utilizando-se gral e pestilo. O carvão foi então peneirado e classificado com granulometria entre 24 e 32 *mesh* por meio de agitação manual.

Para determinação do teor de umidade, colocou-se cerca de 1,0 g de carvão moído, submetendo, posteriormente, à secagem em uma estufa com circulação de ar

forçada a 105 °C, até atingir massa constante. O teor de umidade foi determinado através da Equação 5.

$$TU = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

TU - Teor de umidade à base seca (%)

M<sub>i</sub> - Massa inicial da amostra de carvão úmida (g)

M<sub>f</sub> - Massa final da amostra de carvão seca a 105 °C (g)

O teor de materiais voláteis consistiu na relação entre a massa dos voláteis existentes no carvão e a massa do carvão seco a 105 °C. O cadinho utilizado na determinação do teor de umidade foi submetido à calcinação em um forno mufla a 950 °C, tampado, durante 6 minutos (FIGURA 9). O teor de materiais voláteis foi determinado através da Equação 6.

$$TMV = \frac{M(c.s) - M(c.cal)}{M(c.s)} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

TMV = Teor de materiais voláteis (%)

M (c.s) = Massa do carvão seco em estufa a 105°C (g)

M (c.cal) = Massa do carvão calcinado a 950°C (g)

O teor de cinzas consistiu na relação entre a massa das cinzas e a massa do carvão seco em estufa a 105 °C. Utilizaram-se dois cadinhos sem as tampas por forno com cerca de 1,0 g de amostra com a mesma granulometria do carvão utilizado para o teor de umidade. Em seguida, os cadinhos foram submetidos à combustão completa sob temperatura de 750 °C durante 6 horas. O teor de cinzas foi calculado através da Equação 7.

$$TCZ = \frac{M(ci)}{M(c.cal)} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

TCZ - Teor de cinzas (%)

M (ci) - Massa do carvão incinerado (cinzas) a 750 °C (g)

M (c.cal) - Massa do carvão calcinado a 950 °C (g)

A partir da obtenção de materiais voláteis e de cinzas, o teor de carbono fixo, à base seca, foi determinado através da Equação 8.

$$TCF = 100 - (TMV + TCZ) \quad (8)$$

Onde:

TCF = Teor de carbono fixo (%)

TMV = Teor de materiais voláteis (%)

TCZ = Teor de cinzas (%)

### 3.8.6. Poder calorífico superior do carvão vegetal (PCS)

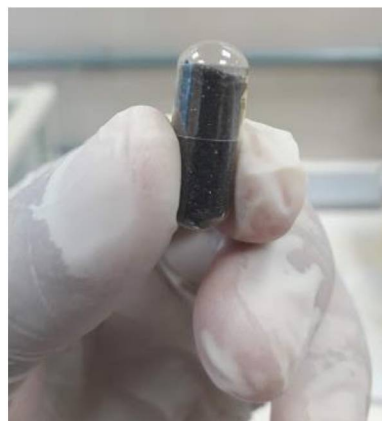
A principal propriedade a ser determinada para um combustível é o seu poder calorífico superior, pois indica a energia disponível no material. O carvão vegetal foi moído e peneirado, posteriormente passando pela peneira de 40 *mesh* e retido na abertura de 60 *mesh*. Em seguida, o material foi secado em estufa, à temperatura de 105 °C até massa constante.

As análises de poder calorífico superior foram realizadas em duplicata, em um calorímetro da marca IKA, modelo C-5000, conforme a norma da American Society for Testing and Materials E-711-87 (ASTM, 2004) (FIGURA 26).

FIGURA 26 – ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO CARVÃO VEGETAL.



(a)



(b)

FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: (a)= Calorímetro modelo C-5000-IKA, (b)= Amostra de carvão vegetal utilizado na determinação do poder calorífico superior.



### 3.8.7. Química elementar do carvão vegetal (C, N, H)

Foram pesadas, cerca de 0,5 mg, em pequenas cápsulas de estanho (3,2 x 4 mm) utilizando uma balança de precisão *Sartorius Micro – XM-1000P* e inseridas no analisador elementar EA 1108 – CHNS-O (*Fisons Instruments*) a 1020 °C, em seguida, ocorreu a injeção de O<sub>2</sub> (puro), elevando a temperatura do forno a 1800 °C, garantindo a total combustão da amostra.

Na combustão, a amostra gera gases de C, H e N. Estes produtos de combustão são medidos por cromatografia gasosa e então é determinada a relação dos elementos da amostra original e, a detecção foi realizada por TCD (detector de condutividade térmica).

### 3.8.8. Análise termogravimétrica do carvão vegetal (TG/DTG)

A análise termogravimétrica do carvão vegetal foi realizada utilizando o aparelho STA 600 da marca *Perkin Elmer* (FIGURA 27). A análise foi feita em atmosfera oxidante com fluxo de ar de 50 ml.min<sup>-1</sup>, utilizando-se aproximadamente 12 mg de cada tipo de carvão vegetal produzido, selecionada em peneiras sobrepostas, com malha de 40 e 60 *mesh* (*American Society for Testing and Materials - ASTM*, 1974). As análises foram realizadas a partir da temperatura ambiente, em torno de 30 °C, até a temperatura máxima de 600 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/minuto.

FIGURA 27 – APARELHO STA 600 DA MARCA *PERKIN ELMER*.



FONTE: Perkin Elmer.

Posteriormente, foram gerados termogramas, utilizando-se o programa estatístico, *ORIGIN PRO 8*, e as funções obtidas foram então interpoladas e derivadas. As funções interpoladas originaram as curvas termogravimétricas (TG)

para a análise do comportamento da resistência térmica do carvão com base na perda de massa sob as referidas faixas de temperatura e as derivadas indicaram, por meio da análise térmica diferencial (DTG), as temperaturas nas quais ocorreram as maiores perdas de massa nos intervalos selecionados visualmente nos gráficos.

#### 4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

O experimento foi realizado no Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), com arranjo fatorial 2x2 (densidades x tempos de carbonização) resultando em 4 tratamentos, com 5 repetições (fornada), conforme mostra o Tabela 5.

TABELA 5 – DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.

Tratamento	Densidade (kg.m <sup>-3</sup> )	Tempo (Horas)	Forno
G1	≥750	10	R1 R2 R3 R4 R5
G1	≥750	12	R1 R2 R3 R4 R5
G2	<750	10	R1 R2 R3 R4 R5
G2	<750	12	R1 R2 R3 R4 R5

FONTE: O autor (2020).

Para o rendimento gravimétrico (RGC) e densidade a granel do carvão vegetal (DGR) foram utilizadas cinco repetições; para friabilidade (FRI) e densidade básica do carvão (DBC) foram utilizadas dez repetições; e para teor de umidade (TU), teor de materiais voláteis (TMV), teor de cinzas (TCZ) e teor carbono fixo (TCF) do carvão vegetal foram utilizadas duas repetições. Para as análises do poder calorífico superior (PCS), foram preparadas amostras compostas de cada tratamento, e utilizadas duas repetições.

Para verificar o efeito das densidades e tempos de carbonização sobre os parâmetros avaliados, os dados foram submetidos ao teste estatístico de *Fisher* por meio da análise de variância (ANOVA) a 95 % de probabilidade ( $p < 0,05$ ). Para isto inicialmente aplicou-se o teste de *Levene* para testar a homogeneidade de variância e o teste de *Shapiro-Wilk* para testar a normalidade dos dados. Quando identificadas



diferenças significativas na ANOVA, aplicou-se o teste de *Tukey* ao nível de 5 % de significância ( $p < 0,05$ ).

Para as análises de química elementar (C, N, H) e análise termogravimétrica (TG/DTG) do carvão vegetal, foram preparadas amostras compostas de cada tratamento, e utilizadas uma repetição.

Os cálculos estatísticos foram realizados com o auxílio do “software” *SPSS*, versão 20.0.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises da produção (rendimento gravimétrico) e qualidade do carvão vegetal, propriedades físicas (densidade a granel e densidade básica), propriedade mecânica (friabilidade), propriedades químicas (teor de umidade, teor materiais voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo) e propriedade energética (poder calorífico superior) apresentaram normalidade nos dados através dos teste de *Shapiro-Wilk* e homogeneidade de variância no teste de *Levene*, o que permitiu análise de variância, com tratamentos fatoriais.

Utilizando-se análise de variância, pode-se concluir que há diferença entre as carbonizações avaliadas, e o fator densidade da madeira influenciou diretamente no rendimento gravimétrico, densidade a granel, friabilidade, densidade básica, materiais voláteis, carbono fixo e cinzas. O poder calorífico superior foi influenciado tanto para o grupo de densidade quanto o tempo de carbonização. Já o teor de umidade não foi influenciado pelos tratamentos aplicados (TABELA 6).

TABELA 6 – VALORES DE TESTE DE FISHER OBTIDOS COM BASE NA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO, DENSIDADE A GRANEL, FRIABILIDADE E DENSIDADE BÁSICA, UMIDADE, MATERIAIS VOLÁTEIS, CARBONO FIXO, CINZAS E PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO CARVÃO VEGETAL.

	F			
	Tratamento	Densidade	Tempo	Densidade x Tempo
Rendimento gravimétrico (%)	4,88*	14,31**	0,03 <sup>NS</sup>	0,32 <sup>NS</sup>
Densidade a granel (kg.m <sup>-3</sup> )	14,58**	41,62**	1,25 <sup>NS</sup>	0,88 <sup>NS</sup>
Friabilidade (%)	12,09**	36,22**	0,002 <sup>NS</sup>	0,07 <sup>NS</sup>
Densidade básica (g.cm <sup>-3</sup> )	52,92**	151,1**	0,002 <sup>NS</sup>	7,67*
Umidade (%)	1,04 <sup>NS</sup>	1,28 <sup>NS</sup>	1,84 <sup>NS</sup>	0,01 <sup>NS</sup>
Materiais voláteis (%)	6,07**	7,85**	0,004 <sup>NS</sup>	10,37**
Carbono fixo (%)	16,77**	33,77**	0,07 <sup>NS</sup>	16,48**
Cinzas (%)	55,10**	162,0**	3,33 <sup>NS</sup>	0,002 <sup>NS</sup>
Poder calorífico superior (kcal kg <sup>-1</sup> )	17,90**	38,21**	8,28*	7,24 <sup>NS</sup>

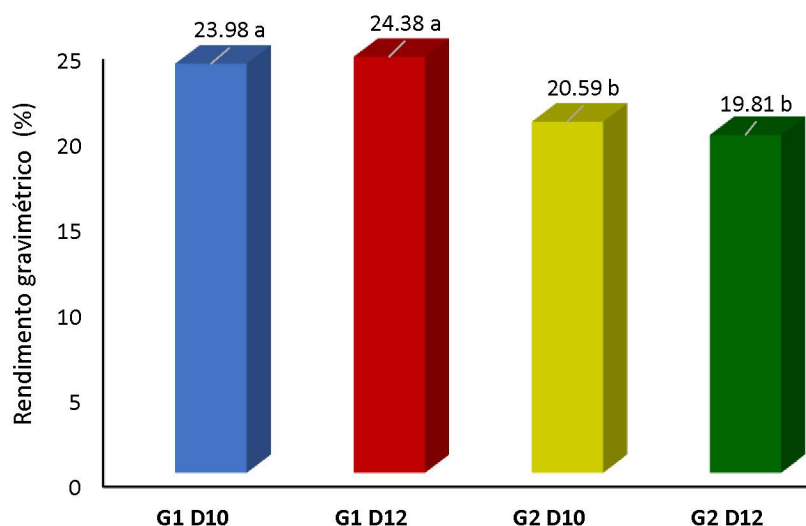
LEGENDA: F: Razão de variância \*: Significativo; \*\*: Altamente significativo; <sup>NS</sup>: Não significativo.

### 5.1. Rendimento gravimétrico do carvão vegetal

O rendimento gravimétrico do carvão apresentou diferença significativa entre os grupos de densidade estudadas e não significativa para o tempo de carbonização (TABELA 6), indicando que ao carbonizar madeiras de alta densidade o rendimento gravimétrico é proveitoso. Sendo uma característica de fundamental importância para o conhecimento do percentual de madeira enforcada que é transformado em carvão.

Os valores de rendimento gravimétrico variaram de 19,81 – 24,38 % (FIGURA 28), para os carvões vegetais do G2 D12 e G1 D12, respectivamente. Esses resultados foram semelhantes aos observados por Silva et al., (2007) carbonizando resíduos florestais das espécies Maçaranduba (25,52 %), Sapucaia (21,53 %) e Timborana (27,62 %).

FIGURA 28 - RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO DO CARVÃO VEGETAL (%) EM CADA CARBONIZAÇÃO AVALIADA.



Médias seguidas da mesma letra, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 95 % de probabilidade.

Densidade, teor de lignina, umidade e diâmetro da madeira influenciam, significativamente o rendimento gravimétrico da carbonização, ou seja, as massas geradas de carvão vegetal, líquido pirolenhoso e alcatrão (BARCELOS et al., 2007). No caso dos resultados deste estudo, a densidade básica da madeira influenciou diretamente no rendimento gravimétrico do carvão.

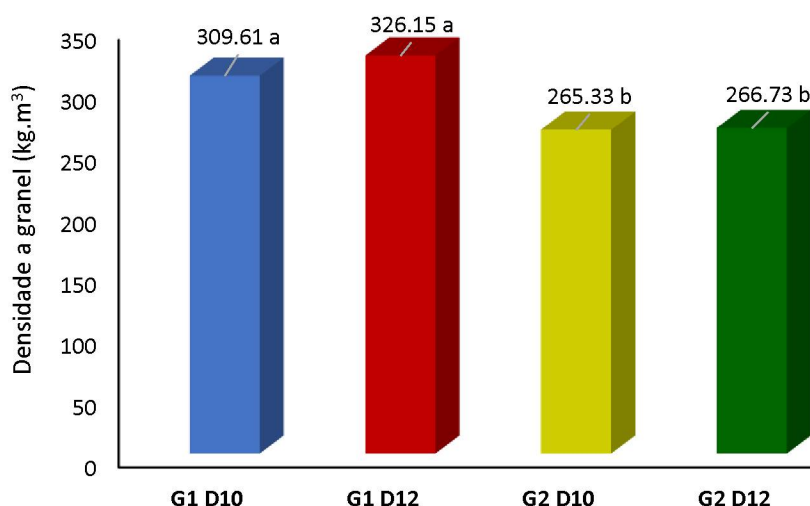
A relação inversamente proporcional da densidade básica com o teor de umidade possivelmente influenciou na redução do rendimento gravimétrico. Madeiras com baixo valor de densidade apresentam parede celular menos espessa e com maior quantidade de espaços vazios ocupados por água, comprovando a teoria de Valente (1986), de que a redução desses rendimentos se deve ao consumo de parte da carga de lenha para evaporar a água, o que diminui o rendimento em base seca.

De acordo com Raad (2017), o carvão vegetal direcionado a indústria siderúrgica deve apresentar valor acima de 30% de rendimento gravimétrico. A utilização de um sistema de pré-secagem da madeira antes do processo de carbonização poderá ser adotada, visando o aumento do rendimento do sistema.

## 5.2. Densidade a granel do carvão vegetal

Para a densidade a granel do carvão vegetal a análise de variância revelou haver efeito significativo para os grupos de densidade estudadas. Entretanto, os tempos de carbonização apresentaram efeito não significativo, apontando que os fatores têm comportamentos estatisticamente independentes (TABELA 6). Os valores médios da densidade a granel do carvão vegetal podem ser visualizados na Figura 29.

FIGURA 29 – DENSIDADE A GRANEL DO CARVÃO VEGETAL ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) EM CADA CARBONIZAÇÃO AVALIADA.



Médias seguidas da mesma letra, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 95 % de probabilidade.

Constatou-se que os carvões do G1 carbonizados em 10 e 12 dias foram mais densos (pesados) que os carvões do grupo G2 carbonizados em 10 e 12 dias, corroborando com a lógica que madeira densa gera carvão vegetal denso.

Em termos práticos de operação onde o carvão vegetal é direcionado para uso industrial, esta propriedade é de grande importância pois determina o espaço a ser ocupado nos aparelhos de conversão energética. Quanto mais elevada a densidade do carvão vegetal, maior será a utilização do volume do alto-forno e o tempo de residência da carga metálica no equipamento, além de ser maior a capacidade de carga em termos de carbono por volume (Carneiro et al., 2013).

Utilizando madeira da espécie *Eucalyptus benthami*, Lima et al., (2012) produziram carvão vegetal com valor médio de  $215 \text{ kg.m}^{-3}$  para densidade a granel, valor inferior ao encontrado neste estudo. Demonstrando, que os carvões produzidos com madeira de alta densidade serão mais eficientes no processo de utilização energética devido apresentar maior quantidade de unidade de massa disponível em um mesmo volume ocupado.

De acordo com Raad (2017), o carvão vegetal direcionado a indústria siderúrgica deve apresentar valor acima de  $180 \text{ kg.m}^{-3}$  de densidade a granel. Sendo assim, todos os carvões analisados neste estudo apresentaram valores adequados para serem utilizados na indústria siderúrgica.

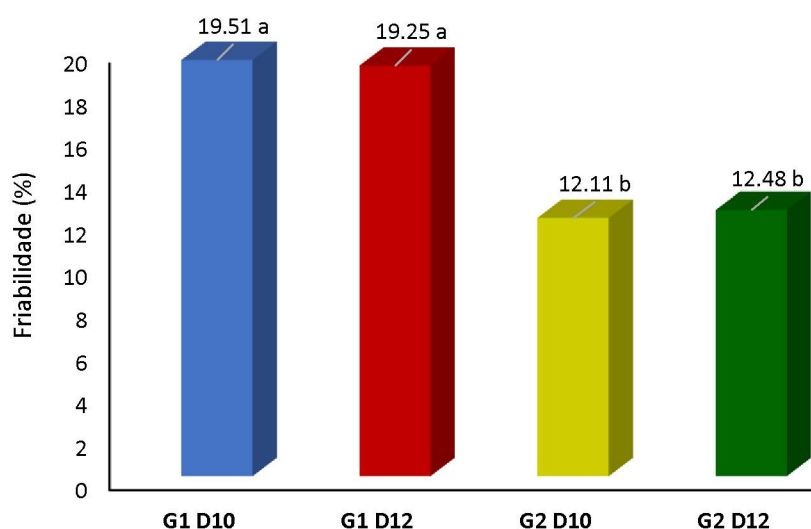
### 5.3. Friabilidade do carvão vegetal

Na TABELA 6, para a friabilidade do carvão vegetal, observou-se que o fator densidade básica da madeira apresentou efeito significativo e não significativo para tempo de carbonização. Demonstrando que o carvão vegetal produzido com madeiras de baixa densidade apresentou maior resistência mecânica ao ser submetido ao teste de tamboramento. As médias da friabilidade do carvão vegetal encontram-se na Figura 30.

Nota-se que o alto valor de friabilidade foi identificado para o grupo das madeiras de alta densidade. Isto significa que o aumento em densidade da madeira, contribui para o aumento da friabilidade do carvão vegetal em processos de carbonização.

No entanto, a grande variação no desvio padrão apresentado nas médias, nos remete a realizar algumas observações, no ponto que, quanto maior a densidade da madeira maior é sua característica de resistência e rigidez, porém ao passar por um tratamento térmico com elevadas temperaturas, como é o caso da carbonização, essa característica referente ao carvão vegetal se torna inversamente proporcional.

FIGURA 30 – FRIABILIDADE DO CARVÃO VEGETAL (%) EM CADA CARBONIZAÇÃO AVALIADA.



Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

A densidade básica da madeira aumenta no sentido medula-casca (OLIVEIRA e SILVA 2003). Então, esta variação de densidade entre as regiões da medula e casca, combinada com o aumento da área do cerne, são responsáveis pela formação de tensões internas durante o processo de perda de umidade, sendo ainda mais drástico quanto maior for a temperatura e velocidade de carbonização, consequentemente, na geração de finos de carvão vegetal (COUTINHO e FERRAZ, 1988).

Silva et al., (2007), produziu carvão vegetal, direcionado a indústria siderúrgica, utilizando resíduos de três espécies florestais amazônicas, Maçaranduba com densidade de  $860 \text{ kg.m}^{-3}$ , Sapucaia com densidade de  $910 \text{ kg.m}^{-3}$  e Timborana com densidade de  $750 \text{ kg.m}^{-3}$ , apresentando friabilidade de 30 % para o carvão de maçaranduba, 29 % para Sapucaia e 13 % para Timborana. Corroborando com os resultados desse estudo de que madeira de alta densidade gera carvão vegetal mais friável.

Segundo a classificação do *Centre Technique Forrestier Tropical* (CTFT) (TABELA 7), o carvão vegetal do G1 nos ciclos de carbonização de 10 e 12 dias são medianamente friáveis e os carvões do G2 carbonizados em 10 e 12 dias são poucos friáveis. Os valores encontrados neste estudo demonstram a pouca geração de finos para o carvão vegetal oriundos de madeiras amazônicas.

TABELA 7 – CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO VEGETAL QUANTO SUA FRIABILIDADE.

<b>Classificação do carvão</b>	<b>Perda em forma de partículas (%)</b>
Muito friável	Superior a 30
Bastante Friável	25 a 29
Medianamente friável	15 a 24
Pouco friável	10 a 14
Muito pouco friável	Inferior a 10

FONTE: CTFT, *Centre Technique Forrestier Tropical*.

Menores friabilidades do carvão vegetal são desejadas, uma vez que as perdas econômicas com o excesso de produção de finos durante a produção e manuseio do carvão vegetal serão menores. Essas características estão diretamente relacionadas à facilidade e otimização do transporte (SILVA et al., 2007). A baixa resistência do carvão resulta na produção acentuada de finos no interior do alto forno, devido à compactação, abrasão e ação da temperatura em que o termorreduzidor é submetido (CETEC, 1982; ASSIS et al., 2016).

A siderurgia exige menores quantidades de finos, pois, ao atingir o cadinho impedem a passagem do ferro e escória líquidos, provocando o aumento na frequência de corridas e variações na composição química e temperatura do gusa. De acordo com Raad (2017), o carvão vegetal direcionado a indústria siderúrgica deve apresentar a menor quantidade de geração de finos possível. Sendo assim, todos os carvões analisados neste estudo apresentaram valores adequados para serem utilizados na indústria siderúrgica.

#### 5.4. Densidade básica do carvão vegetal

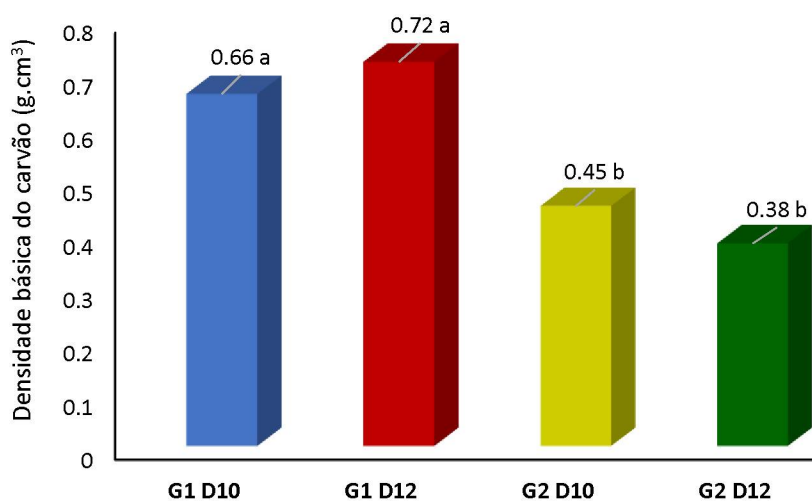


Para a densidade básica do carvão vegetal, a análise de variância detectou efeito significativo para o fator densidade básica da madeira e não significativo para o tempo de carbonização (TABELA 6). Esse resultado ratifica a teoria de que madeira de alto valor de densidade irá gerar carvão vegetal de alta densidade. As médias de densidade básica do carvão produzido em cada carbonização avaliada podem ser observadas na Figura 31.

Os valores de densidade básica de carvão obtidos neste estudo são muito próximos dos carvões de madeiras tropicais com densidades equivalentes encontrados em várias pesquisas como, por exemplo, Numazawa (2000), Silva et al., (2007) e Silva et al., (2020).

A densidade do carvão vegetal é uma das propriedades físicas mais importantes, uma vez que indica a quantidade de massa disponível e confere maior resistência mecânica. Quanto maior a densidade do carvão vegetal, maior será a quantidade, em massa de carbono no interior do alto forno. Logo, há uma otimização da utilização do espaço interno do alto forno quanto maior for a densidade do carvão vegetal (NOGUEIRA e LORA, 2003; VALE et al., 2010; ISABEX, 2018).

FIGURA 31 – DENSIDADE BÁSICA DO CARVÃO VEGETAL ( $\text{G.CM}^{-3}$ ) EM CADA CARBONIZAÇÃO AVALIADA.



Médias seguidas da mesma letra, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

Embora o G2 D10 e G2 D12 (0,45 e 0,38  $\text{g.cm}^{-3}$ ) tenham apresentado resultados inferiores aos demais grupos, seu uso energético não é comprometido,

uma vez que quando comparado aos números encontrados por Pereira et al., (2016), para carvão vegetal de clones de *Eucalyptus spp.* (0,36 a 0,40 g.cm<sup>-3</sup>), que é a espécie mais utilizada para produção de carvão vegetal, permite inferir que todos os carvões vegetais produzidos terão performance satisfatória no processo siderúrgico.

Estudo realizado por Silva et al., (2020), carbonizando resíduos madeireiros das espécies, *Handroanthus serratifolius* (Vahl) S.O. (ipê-amarelo), *Hymenolobium petraeum* Ducke (angelim-pedra), e *Enterolobium schomburgkii* (Benth.) Benth (orelha-de-macaco) obteve valores de densidade do carvão vegetal de 0,62 g.cm<sup>-3</sup>, 0,56 g.cm<sup>-3</sup> e 0,46 g.cm<sup>-3</sup>, respectivamente. Valores semelhantes ao encontrado nesse estudo.

Segundo Silva et al., (2007), a relação direta entre a densidade básica da madeira com a densidade básica do carvão, intensifica a importância da separação de resíduos por espécies, assim como a sua escolha para produção de carvão vegetal. Esse procedimento permite prever as características do carvão, mediante a avaliação da densidade de sua madeira, proporcionando que a empresa direcione sua produção conforme a necessidade do consumidor, e realize pesquisas no intuito de melhorar as características do carvão.

De acordo com Carneiro et al., (2016), o carvão para uso siderúrgico deve apresentar densidade aparente acima de 0,35 g.cm<sup>-3</sup>. Sendo assim, todos os carvões analisados neste estudo apresentaram valores adequados para serem utilizados na indústria siderúrgica.

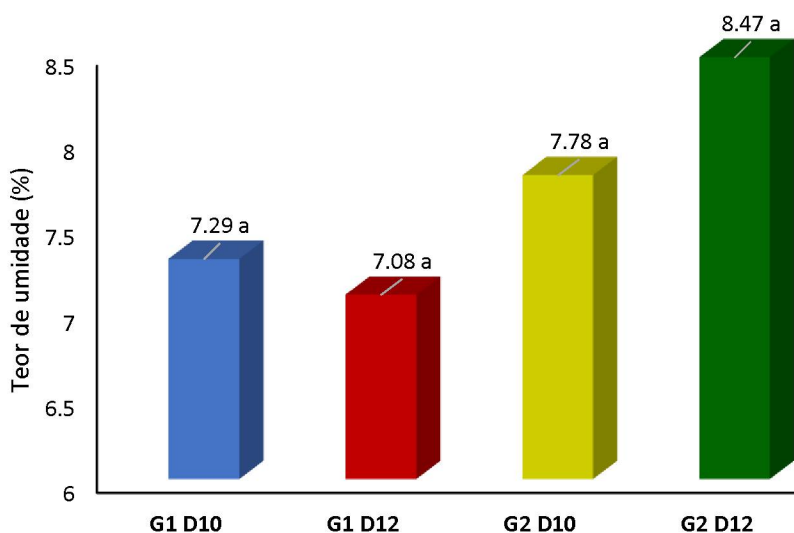
#### 5.5. Teor de umidade do carvão vegetal

Para esta variável, todos os carvões vegetais produzidos apresentaram valores adequados para uso siderúrgico (FIGURA 32). De acordo com Brand (2010), carvões vegetais direcionados a indústria de redução do minério de ferro devem apresentar até 10 % de teor de umidade.

O carvão é um produto higroscópico, ou seja, tem alta capacidade de absorver umidade, podendo em poucas horas absorver de 4 a 16 % de sua massa em água (carvão recém-produzido) (SILVA, 2017). Devido a esta característica, torna-se um grande desafio garantir esta característica dentro dos padrões desejáveis para fins siderúrgicos.

A água é extremamente prejudicial à operação no alto-forno e, provoca perda de calor, aumentando o consumo específico de carbono e o alto teor de umidade influencia na capacidade energética do carvão vegetal, sendo inversamente proporcional, ou seja, quanto maior a umidade do carvão menor é o seu poder calorífico(FROEHLICH et al., 2014).

FIGURA 32 – TEOR DE UMIDADE DO CARVÃO VEGETAL (%) EM CADA CARBONIZAÇÃO AVALIADA.



Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

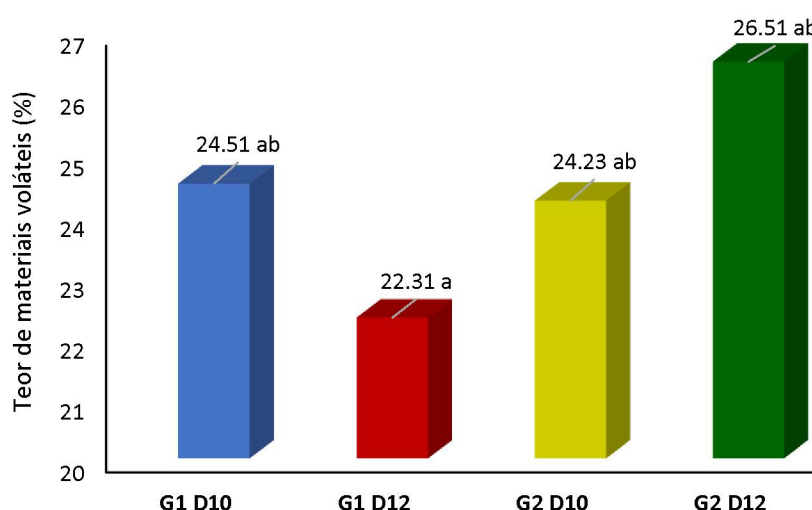
Segundo Rosillo-Calle, Bajay e Rothman (2005), o teor de umidade do carvão apresenta-se adequado ao uso siderúrgico, quando o teor de umidade for < 12 %, pois valores superiores a esse reduzem significativamente o valor do calor de combustão, da temperatura da câmara de queima e da temperatura dos gases de escape. Assim, pode-se afirmar que todos os carvões vegetais produzidos nesse estudo apresentam valores médios de teores de umidade para uso siderúrgico.

Estudo realizado por Fortaleza et al., (2019) encontraram umidade do carvão vegetal de espécies nativas da Amazônia *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. (6,91 %), *Guatteria* sp. (6,87 %) e *Brosimum* sp. (7,40 %), valores semelhantes aos observados nesse estudo.

## 5.6. Teor de materiais voláteis do carvão vegetal

Na Figura 33, encontram-se os valores médios do teor de materiais voláteis contidos nos carvões vegetais de acordo com a carbonização avaliada. Constatase que os carvões do G2 carbonizados em 12 dias apresentaram a maior média, 26,51 %. Sendo o G1 12 dias apresentando a menor média de 22,31 %. Devido a madeira de baixa densidade apresentar menor quantidade da massa a ser carbonizada, sendo assim, volatilizando com maior facilidade os gases presentes na madeira.

FIGURA 33 – TEOR DE MATERIAIS VOLÁTEIS DO CARVÃO VEGETAL (%) EM CADA CARBONIZAÇÃO AVALIADA.



Médias seguidas da mesma letra, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

Picancio et al., (2018), afirma que o teor de materiais voláteis no carvão vegetal para uso siderúrgico deve estar entre 25 % e 35 %, visto que esse é um parâmetro que apresenta comportamento inversamente proporcional ao teor de carbono fixo no carvão, comprometendo, dessa forma, a eficiência do redutor durante as operações.

O ideal é que o carvão vegetal apresente menor percentual de materiais voláteis, visto que correspondem aos resíduos volatilizados, e um maior quantitativo de carbono fixo que proporciona uma queima mais lenta e melhor rendimento do material nos fornos (REIS et al., 2012; LINS et al., 2020).

Os materiais voláteis podem ser definidos como substâncias que são desprendidas da madeira como gases durante a carbonização e/ou na queima do carvão vegetal. São principalmente de gases combustíveis, como H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> e outros

hidrocarbonetos. Segundo Brand (2010), baixos teores de materiais voláteis tendem a altos teores de carbono fixo no carvão vegetal, ou seja, eles poderão requerer longo tempo de residência na fornalha para queima total.

Contudo, o carvão com elevado conteúdo de voláteis pode ser de fácil inflamabilidade, por necessitar de baixas temperaturas de ignição, desde que o sistema de conversão esteja dimensionado para fornecer a quantidade de ar necessária para que ocorra um regime de combustão completa, além da granulometria das peças que exerce forte influência na combustibilidade, temperatura máxima fornecida e tempo de residência, conforme relatado por Dias Júnior et al., (2015).

Estudo realizado por Ramos et al., (2019), encontrou valor médio de 28% de materiais voláteis para o carvão vegetal de híbridos de *Eucalyptus urophylla x grandis* e para carvão mineral valor médio de 4,2%. Evidenciando que os resultados encontrados neste estudo estão dentro do limite dos carvões que são utilizados na indústria siderúrgica.

#### 5.7. Teor de carbono fixo do carvão vegetal

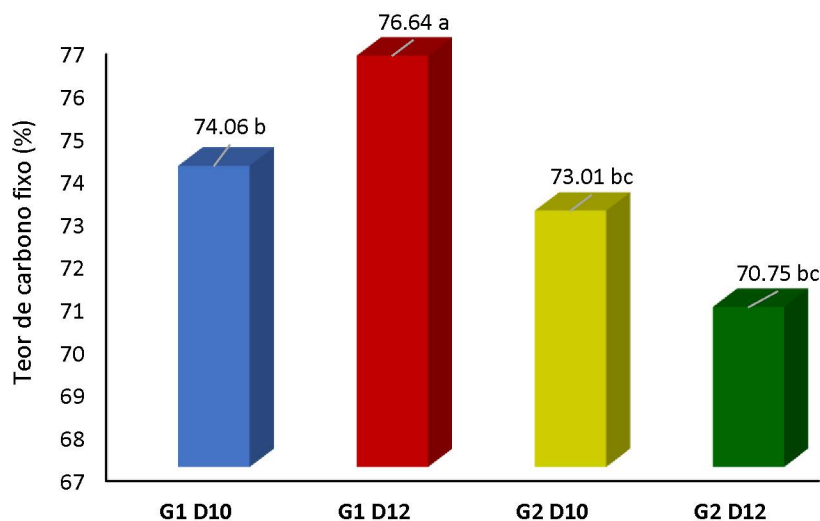
Existe uma relação inversamente proporcional entre materiais voláteis e carbono fixo, quanto maior for a exposição ao calor, mais elementos gasosos são desprendidos da madeira e, conseqüentemente, há aumento na concentração da fração sólida (carbono fixo) e como resultado aumentará o valor energético do carvão vegetal. Os resultados encontrados para o teor de carbono fixo do carvão vegetal em cada carbonização avaliada podem ser visualizados na Figura 34.

Esta variável é o componente predominante do carvão vegetal, portanto, quanto maior o seu valor maior será a energia de combustão e o seu valor calórico, além de apresentar um regime de queima mais lento, podendo residir por um maior período no aparelho destinado a queima (BRAND, 2010).

Segundo Radd (2017), a faixa desejada de carbono fixo no carvão para uso siderúrgico está compreendida entre 70 % e 80 %. Sendo assim, todos os carvões analisados neste estudo apresentaram valores adequados para serem utilizados na indústria siderúrgica.

Elevado teor em carbono fixo é desejável, principalmente, na siderurgia, em razão da alta resistência a degradação térmica do carvão, o que possibilita maior residência da fração sólida no interior do forno siderúrgico (PICANCIO et al., 2018).

FIGURA 34 – TEOR DE CARBONO FIXO DO CARVÃO VEGETAL (%) EM CADA CARBONIZAÇÃO AVALIADA.



Médias seguidas da mesma letra, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

Além disso, os teores de carbono fixo e materiais voláteis foram semelhantes para o carvão avaliado e sabe-se que o valor calórico é altamente dependente dessas características químicas (TRUGILHO e SILVA, 2001; VALE et al., 2010).

A lignina é o polímero de maior teor de carbono entre os componentes da biomassa, sendo o principal contribuinte na formação do carvão vegetal entre os componentes da madeira, pois possui elevada estabilidade térmica e pode afetar consideravelmente o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e em carbono fixo e a densidade relativa aparente, conforme observado por Vale et al., (2010) e Trugilho et al., (2014).

Ao avaliar carvão vegetal de jatobá (*Hymenaea courbaril* L.) produzido em diferentes temperaturas (300 a 900 °C), Trugilho e Silva (2001) atestam que o aumento de temperatura durante o processo de carbonização ocasiona um incremento considerável no poder calorífico superior, estando associado ao elevado conteúdo de carbono fixo.



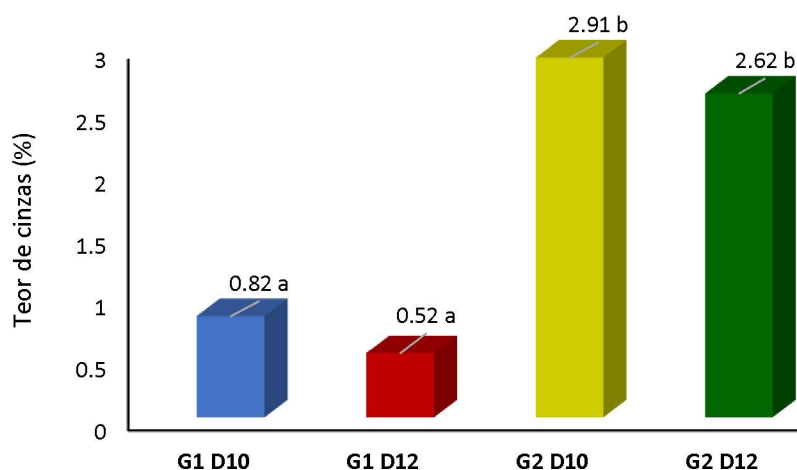
O carvão vegetal que possui elevadas concentrações de carbono fixo é indicado para uso siderúrgico, devido aparentar menor concentração de materiais voláteis e maior conteúdo de carbono, principal elemento necessário para a redução do Ferro (Fe) durante a produção de gusa. Para Brito (1993), as fissuras decorrentes da eliminação dos materiais voláteis durante o aquecimento seriam menores, diminuindo-se assim o índice de redução granulométrica e de geração de finos no alto forno.

Ao estudar o carvão vegetal produzido com madeira de Cedrinho (*Scleronema* sp.) e Louro (*Ocotea* sp.), ambas espécies amazônicas, Silva et al., (2014), encontraram resultados para carbono fixo de 69,54 % e 71,73 %, respectivamente. Estudo realizado por Ramos et al., (2019), encontrou valor médio de 70 % de carbono fixo para o carvão vegetal de híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *grandis* e para carvão mineral valor médio de 89 %.

#### 5.8. Teor de cinzas do carvão vegetal

A análise de teor de cinzas do carvão vegetal revela a ocorrência de diferença significativa entre os grupos em função da densidade básica da madeira (FIGURA 35). No entanto, não foi observada diferenças significativas em relação aos tempos de carbonização.

FIGURA 35 – TEOR DE CINZAS DO CARVÃO VEGETAL (%) EM CADA CARBONIZAÇÃO AVALIADA.



Médias seguidas da mesma letra, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.



O teor de cinzas constitui-se nos resíduos de óxidos de minerais obtidos pela combustão completa do carvão vegetal. Elevados teores de cinzas contribuem para a redução do poder calorífico do carvão vegetal, uma vez que os minerais não participam da combustão, mas são contabilizados na massa do combustível (NOGUEIRA; LORA, 2003; BRAND, 2010).

Vale ressaltar que as cinzas estão presentes tanto na casca como no lenho e podem danificar os equipamentos por meio de corrosão (PEREIRA et al., 2016). Sugere-se que estes valores podem ter sido altos devido à presença das cascas na amostra, bem como resíduos de outra natureza (como poeiras) que estivessem aderidos a elas.

Além disso, os elevados percentuais de cinzas apresentam forte tendência em formar incrustações dentro dos equipamentos de queima, devido aos altos teores de sílica e óxidos alcalinos (PELANDA et al., 2015), causando a redução da eficiência energética por dificultarem a troca térmica.

Os valores médios encontrados para as espécies neste estudo, estão de acordo com os resultados obtidos por Numazawa (1986), Aquino (2003), Silva et al (2007) Silva et al., (2014) e Fortaleza (2019), ao avaliarem as propriedades do carvão vegetal de resíduo essências florestais nativas da Amazônia, apresentando valores de 0,22 a 2,5 % de teor de cinzas. Estudo realizado por Ramos et al., (2019), encontrou valor médio para carvão mineral valor médio de 6,9 %.

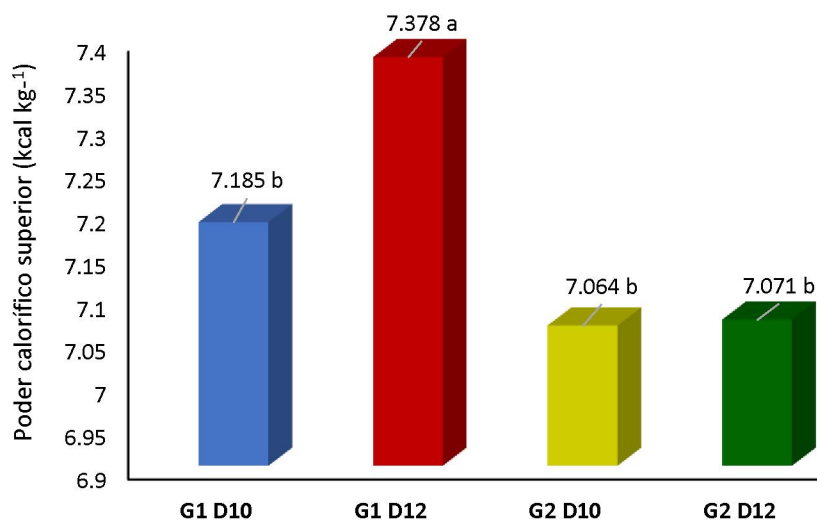
Apesar do agrupamento das espécies em dois grandes grupos de madeira, o elevado coeficiente de variação encontrado para o teor de cinzas evidencia a heterogeneidade da matéria-prima, e Souza et al., (2016) também atribuíram a alta variação (34 %) às pequenas quantidades percentuais das cinzas quando comparada aos outros constituintes químicos do carvão vegetal.

De acordo com Barcellos (2007) e Brand (2010), entre as características ideais para o carvão siderúrgico, deve-se citar o teor de cinzas, podendo variar de 1 a 4%. Nestas condições, pode-se afirmar que os teores de cinzas encontrados para os carvões vegetais produzidos neste trabalho estão de acordo com o requerido pela indústria siderúrgica.

#### 5.9. Poder calorífico superior do carvão vegetal

Conforme a Figura 36, pode-se observar que o poder calorífico do carvão vegetal varia entre os grupos de madeira estudadas. Apresentando o maior valor para o grupo de madeiras de alta densidade carbonizadas em 10 e 12 dias.

FIGURA 36 – PODER CALORÍFICO SUPERIOR (kcal kg<sup>-1</sup>) DO CARVÃO VEGETAL EM CADA CARBONIZAÇÃO AVALIADA.



Médias seguidas da mesma letra, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

Analisando apenas do ponto de vista da energia liberada por unidade de massa seca, os carvões vegetais produzidos apresentam valor adequado para uso siderúrgico. Soares et al. (2015), analisando o carvão vegetal proveniente do gênero *Eucalyptus*, direcionados a indústria siderúrgica, constaram valor energético de 7,193 a 7,478 kcal kg<sup>-1</sup>, valores semelhantes aos encontrados nesse estudo.

Vale ressaltar que o PCS apresentou comportamento semelhante ao encontrado para a densidade básica do carvão, evidenciando a importância do elevado estoque em carbono na biomassa e a quantidade de energia liberada durante o processo de combustão. Esse resultado indica que essas propriedades são importantes na seleção de matérias-primas para a produção de carvão vegetal.

No uso energético do carvão vegetal a quantidade de energia calorífica liberada pelo material é a informação chave para ajustar a quantidade a ser inserida no processo com intuito de atender uma determinada produtividade energética (BRAND, 2010). Segundo Teleken et al., (2015), o aumento do teor de carbono

proporciona o aumento do poder calorífico, ao mesmo tempo em que exige maior tempo de permanência em queimadores devido à queima mais lenta e uniforme.

De acordo com Petroff e Doat (1978), Oliveira et al., (1982), Satonaka (1982), o poder calorífico pode variar de acordo com a composição química do carvão (teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas). Os resultados obtidos nesse trabalho vêm confirmar esta argumentação, ou seja, em face da menor quantidade de materiais voláteis e a grande quantidade de carbono fixo, o carvão vegetal do G1 D10 e G1 D12 apresentaram maior valor de poder calorífico.

Nobre et al., (2015), encontraram resultados semelhantes ao deste estudo para poder calorífico superior do carvão vegetal produzido a partir de resíduos da madeira de *Manilkara huberi* (Ducke) e *Tabebuia serratifolia* (Vahl) Nichols, espécies nativas da Amazônia, que apresentaram poder calorífico superior de 7,762 kcal kg<sup>-1</sup> e 7,696 kcal kg<sup>-1</sup>, respectivamente.

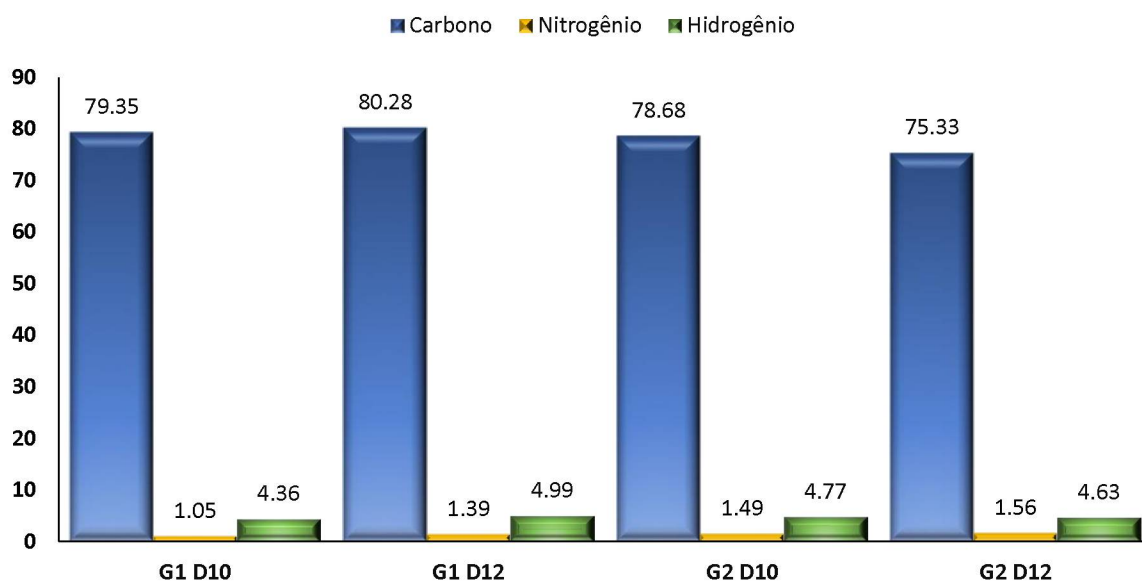
Observa-se que os valores encontrados neste estudo são semelhantes aos citados na literatura. O carvão vegetal com maior poder calorífico proporciona, especialmente para o emprego siderúrgico, menor consumo de insumo redutor, considerando uma mesma produtividade. Provavelmente, o maior poder calorífico superior observado neste estudo se deve aos altos teores de carbono fixo obtidos para os carvões produzidos com madeira de alta densidade.

#### 5.10. Análise elementar do carvão vegetal (C, N, H)

Os resultados dos teores de carbono, nitrogênio e hidrogênio elementar encontram-se na Figura 37. Observa-se que os valores de carbono (C) presentes no carvão vegetal do G1 D10 e G1 D12 foram superiores ao do grupo de madeira de baixa densidade.

De modo geral, o percentual de carbono elementar tem relação positiva com o rendimento em carvão, devido à degradação térmica dele. Isso pode ser observado para o carvão vegetal produzido com madeira de baixa densidade, que apresentou menores concentrações de carbono para o carvão do G2 D10 e G2 D12.

FIGURA 37 – COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DO CARVÃO VEGETAL EM CADA CARBONIZAÇÃO AVALIADA.



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: G1 D10 = densidade básica  $\geq 750 \text{ kg.m}^{-3}$  ciclo de 10 dias; G1 D12 = densidade básica  $\geq 750 \text{ kg.m}^{-3}$  ciclo de 12 dias; G2 D10 = densidade básica  $< 750 \text{ kg.m}^{-3}$  ciclo de 10 dias; G2 D12 = densidade básica  $< 750 \text{ kg.m}^{-3}$  ciclo de 12 dias;

Oliveira et al. (2010), usando a mesma temperatura de carbonização para a madeira de *Eucalyptus pellita* obteve carvão com 76,92% e 2,63% para carbono e hidrogênio, valores inferiores aos encontrados neste estudo.

Os elementos químicos elementares têm uma alta relação com o valor calórico dos combustíveis (BRAND, 2010). O valor de energia de um carvão está intimamente relacionado com as proporções de H/O/C. Dessa forma, pode-se compreender o potencial energético dos carvões vegetais produzidos analisando-se as relações existentes entre os átomos de carbono, hidrogênio e oxigênio. Provavelmente, devido às similaridades observadas nos valores encontrados, os poderes caloríficos dos carvões avaliados serão semelhantes.

Estudo realizado por Ramos et al., (2019), encontrou valor médio de 75 % de carbono elementar para o carvão vegetal de híbridos de *Eucalyptus urophylla x grandis* e para carvão mineral valor médio de 95 %.

Para os valores de H, observou-se pequena variação entre os carvões vegetais produzidos, com valores de 4,36 % (G1 D10) a 4,99 % (G1 D12). De fato, verificou-se que o carvão vegetal G1 D12 apresentou o maior teor de carbono

elementar, consequentemente, influenciou no poder calorífico superior do combustível, sendo este, o maior entre os quatro grupos de carvões produzidos.

Estudo realizado por Ramos et al., (2019), encontrou valor médio de 3,3 % de hidrogênio elementar para o carvão vegetal de híbridos de *Eucalyptus urophylla x grandis* e para carvão mineral valor médio de 1,7 %.

Os valores do nitrogênio elementar apresentaram valores semelhantes entre os carvões vegetais produzidos nas carbonizações avaliadas. Exibindo valores de 1,05 %, para o G1 D10 e 1,56 % para G2 D12. A presença de nitrogênio e enxofre resulta na formação de gases NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>, altamente tóxicos e poluentes do ambiente. Portanto, quantidades diminutas destes componentes elementares são desejáveis no processo de utilização do carvão vegetal (REIS et al., 2012; LEITE et al., 2015; SOARES et al., 2014).

Para o carvão vegetal, produzido a partir da madeira de *Eucalyptus pellita* F. Muell., em diferentes marchas de carbonização, Oliveira et al. (2010) relataram teores de nitrogênio de 0,31% a 0,65%, ou seja, inferior ao encontrado neste trabalho. Di Blasi (2008) constatou que o carvão vegetal produzido a baixas temperaturas retém mais nitrogênio, no entanto, a temperaturas mais altas este elemento é liberado. Os resultados observados por esses autores assemelham-se ao observado neste trabalho, pois o carvão vegetal foi produzido em uma temperatura baixa (450-500 °C).

Entende-se que uma elevada concentração de carbono é uma característica da potencialidade energética da biomassa vegetal, e está correlacionado ao poder calorífico. Quanto ao teor de nitrogênio, é desejável que o carvão vegetal apresente baixas quantidades desse constituinte elementar, pois este resulta em poluição ambiental, como a formação de óxidos de nitrogênio tóxicos após a combustão, e podem promover a formação de chuva ácida, acidificação de solos, além de corrosão nos equipamentos utilizados na conversão energética (KUMAR et al., 2010; DIONIZIO et al., 2019).

Estudo realizado por Ramos et al., (2019), encontrou valor médio de 0,6 % de nitrogênio elementar para o carvão vegetal de híbridos de *Eucalyptus urophylla x grandis* e para carvão mineral também valor médio de 0,6 %, valores inferiores ao encontrado nesse estudo.

Vale ressaltar, que o carvão mineral amplamente utilizado nas indústrias siderúrgicas apresenta teores de nitrogênio e enxofre de até 2,12 % e 6,29 %, respectivamente (WARD, ZHONGSHENG; GURBA 2008), valores superiores aos

encontrados nesse estudo. De acordo com Demirbas (2001), afirma que a combustão de carvão vegetal produz 90 % menos enxofre que o carvão mineral.

Para a produção de bioenergia é desejável que a biomassa apresente baixas quantidades de nitrogênio e enxofre, pois esses constituintes podem resultar em formação de chuva ácida e corrosão dos equipamentos utilizados, devido à liberação de gases  $\text{NO}_x$  e  $\text{SO}_x$ , durante as reações de combustão (BILGEN; KAYGUSUZ, 2008; BUFALINO et al., 2012; KUMAR et al., 2010).

#### 5.11. Análise termogravimétrica do carvão vegetal (TG/DTG)

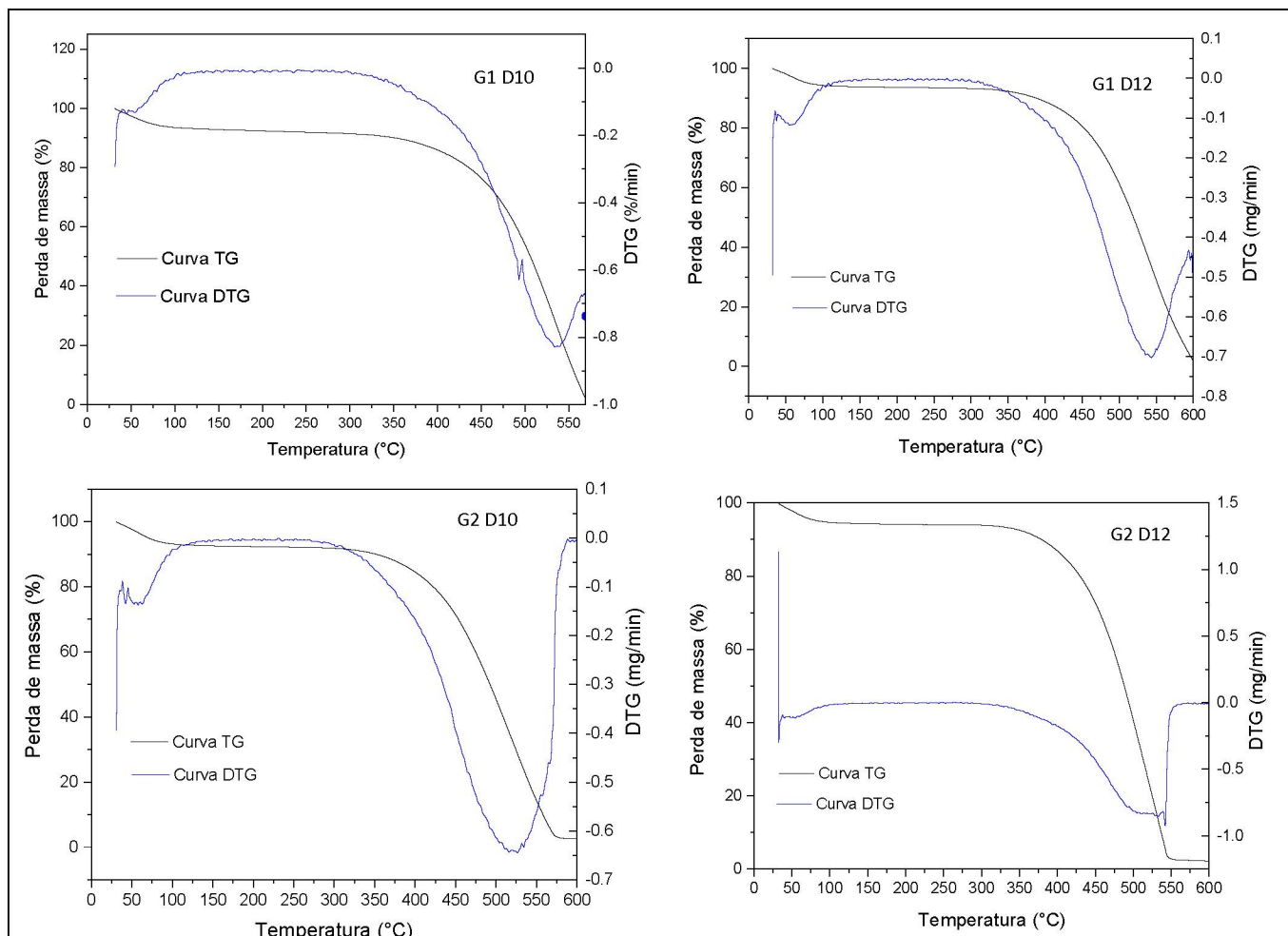
A análise termogravimétrica fornece dados sobre a perda de massa em função da temperatura, o que é especialmente interessante quando se quer observar o comportamento térmico da biomassa durante o seu processamento de uso energético (VAZ JÚNIOR, 2015). Os resultados da análise de TG e DTG dos carvões vegetais produzidos, podem ser observados na Figura 38.

Observa-se, a partir da Figura 38, que o comportamento durante a degradação térmica dos carvão vegetais foram muito semelhantes com perdas de massa, mais acentuadas numa faixa aproximada de temperatura e com picos de energia liberada, expressos pela análise térmica diferencial, também bem próximos.

De acordo com a curva TG, a degradação do carvão vegetal ocorre em duas fases. Observa-se a ausência da fase correspondente a degradação de hemiceluloses, o que significa que a degradação térmica das hemiceluloses já ocorreu durante o processo de carbonização da madeira. O início da perda de massa do carvão vegetal ocorre em temperaturas próxima ao início da degradação térmica dos componentes de celulose e lignina.



FIGURA 38 - CURVA TG E CURVA DTG DO CARVÃO VEGETAL DE CADA CARBONIZAÇÃO AVALIADA.



Fonte O autor, 2020.

LEGENDA: G1 D10 = densidade básica  $\geq 750 \text{ kg.m}^{-3}$  ciclo de 10 dias; G1 D12 = densidade básica  $\geq 750 \text{ kg.m}^{-3}$  ciclo de 12 dias; G2 D10 = densidade básica  $< 750 \text{ kg.m}^{-3}$  ciclo de 10 dias; G2 D12 = densidade básica  $< 750 \text{ kg.m}^{-3}$  ciclo de 12 dias;

De acordo com a termogravimetria, a perda de massa do carvão vegetal, iniciou-se na faixa da temperatura de 300 °C (Figura 38). Segundo Conesa et al., (1995) afirmam que as hemiceluloses sofrem maiores picos de degradação entre 200 e 300 °C e a celulose entre 240 e 350 °C. Oliveira e Silva (2003), ao estudarem o comportamento das curvas termogravimétricas da madeira de *Eucalyptus grandis* observaram que a degradação térmica da mesma teve início a 150 °C de temperatura, sendo essa mais acentuada na faixa entre 250 e 450 °C, com redução de 68,52 % da massa inicial.

A curva TG mostra (Figura 38) que a decomposição da lignina teve seu início na faixa de temperatura de 350 e 550 °C. O conteúdo da lignina é um parâmetro

importante a ser avaliado na qualidade do carvão vegetal, porque dentro de produtos químicos moleculares elementos de madeira é o que apresenta maior resistência à degradação térmica (PEREIRA et al., 2013; YANG et al., 2007).

A lignina apresenta um conteúdo de carbono cerca de 50 % maior do que o encontrado nos polissacarídeos, conseqüentemente é o componente de maior massa molecular, apresentando maior estabilidade térmica, sendo assim um componente mais favorável à produção de carvão vegetal (CASTRO, 2011).

O conhecimento do teor deste componente é fundamental para produção de energia e carvão vegetal, pois a lignina apresenta alto poder calorífico ( $6.100 \text{ kcal.kg}^{-1}$ ) e há fortes evidências de que contribui significativamente para a formação do carbono residual, devido à sua estrutura complexa (PETROFF; DOAT, 1978; PEREIRA et al., 2012).

No presente estudo, para as mesmas condições, foram encontrados, de modo geral, para todos os carvões vegetais produzidos, maiores picos de energia liberada nas faixas de temperaturas entre  $500^\circ\text{C}$  e  $550^\circ\text{C}$ , isso se deve ao início da degradação do componente lignina. Vale ressaltar que a lignina é um componente desejável na conversão da madeira em carvão e seu teor e tipo são parâmetros importantes, do ponto de vista de utilização industrial, devido a maior resistência à degradação térmica, promovida pela presença de estruturas mais condensadas.

É importante conhecer as fases de degradação do carvão vegetal, visto que a partir desta é possível compreender e determinar a faixa de temperatura a ser empregado no uso siderúrgico para que seu uso seja otimizado (VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013). Nesse sentido, os carvões vegetais produzidos apresentaram comportamento térmico adequado para sua utilização no alto-forno.

## 6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES

A realização dos agrupamentos dos resíduos em função da densidade básica da madeira mostrou-se uma técnica eficaz e econômica, devido a sua possibilidade de realização em campo, sendo assim não modificando a estrutura do processo de carbonização já adotado pela empresa.

A densidade básica da madeira foi o fator que mais influenciou no rendimento e características qualitativas do carvão vegetal produzido. Enquanto, os tempos de carbonizações adotados, 10 e 12 dias, não apresentaram efeito significativo. Considerando assim, que o menor ciclo de carbonização pode ser uma nova variável a ser adotada pela empresa.

O grupo de carvão vegetal produzido com madeiras de alta densidade apresentou maior rendimento gravimétrico. Indicando maior quantidade de massa produzida com este grupo.

A densidade a granel e a densidade básica do carvão vegetal exibiram valores satisfatório para uso siderúrgico, todos acima de  $0,35 \text{ g.cm}^{-3}$  para densidade básica e de  $200 \text{ kg.m}^{-3}$  para densidade a granel, apresentando um carvão com maior quantidade de energia a ser liberada durante o processo de oxi-redução do minério de ferro.

A resistência mecânica do carvão vegetal apresentou valores adequados para serem utilizados em escala industrial, para todos os grupos avaliados.

O teor de umidade apresentou valores adequados para uso siderúrgico, todos abaixo de 10 %, como é recomendado pela indústria siderúrgica.

Os teores de materiais voláteis e carbono fixo apresentaram valores de elevada qualidade para uso siderúrgico. Em destaque o carvão vegetal produzido com madeiras de alta densidade apresentando maior concentração de carbono fixo (76,64 %) e carbono elementar (80,28 %), e poder calorífico superior ( $7,378 \text{ kcal kg}^{-1}$ ).

O comportamento térmico observado nos termogramas é semelhante entre os carvões vegetais produzidos. Considerando a faixa de temperatura que é utilizada no alto forno de gusa, todos os materiais apresentaram desempenho satisfatório devido a presença da lignina.

Em relação ao aproveitamento de resíduos do manejo florestal sustentável, todos os grupos de madeira podem ser confirmados para a produção de carvão vegetal e, ainda, considerando que a carbonização é um processo alternativo para

mitigar o passivo ambiental causado pelos resíduos, evitando-se o descarte no meio ambiente. Conclui-se, portanto, que o carvão de resíduos de exploração florestal é mais um produto comercializável de origem renovável e de boa qualidade energética, além de proporcionar a agregação de valor aos resíduos e um melhor aproveitamento da biomassa florestal.

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM D-1762- 84**: standard method for chemical analyses of wood charcoal. Philadelphia, 2007. 2 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM E-711-87**: Standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter. Philadelphia, 2004. 8 p.
- AQUINO, J. N. **Caracterização do carvão de resíduos de processamento primário da madeira e sua potencialidade energética**. 2003. Universidade Federal Rural da Amazônia. Belém, PA. 81pp.
- ARRUDA, T. P. M.; PIMENTA, A. S.; VITAL, B. R.; LUCIA, R. M. D.; ACOSTA, F. C. Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.35, n. 4, p. 949-955, 2011.
- ASSIS, M. R.; BRANCHERIAU, L.; NAPOLI, A.; TRUGILHO, P. F.; Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. **Wood Science and Technology**, New York, v. 1, n. 3, p. 1-18, May 2016. DOI: 10.1007/s00226-016-0812-6
- ASSIS, M. R.; PROTÁSIO, T. P.; ASSIS, C. O, PAULO FERNANDO TRUGILHO, P. F, SANTANA, W. M. S. Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 291-302, jul./set. 2012. DOI: 10.4336/2012.pfb.32.71.291.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8633**, segundo a norma 167-73 ABNT (adaptada), 1375-80 ABNT, 1375-80. Brasília: ABNT, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11941**: Determinação da densidade básica em madeira. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14929**: Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro: 3 p. 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: 1997. 107p.
- BARCELLOS, D. C. **Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo**. 2007. 140 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.
- BOTREL, M. C. G.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; SILVA, J. R. M. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 391-398, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622007000300004>

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131p.

BRAND, M. A.; RODRIGUES, A. A.; OLIVEIRA, A.; MAURO SILVEIRA MACHADO, M. S.; ZEN, L. R. Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico comercializado na região serrana sul de Santa Catarina. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.39, n.6, p.1165 - 1173, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/0100-67622015000600020>

BRASIL. **Balanco energético nacional 2015: ano base 2014**. 9. ed. Rio de Janeiro: Empresa de pesquisa energética, 2015.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco energético nacional 2019: ano base 2018**. 12. ed. Rio de Janeiro, 2019.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Potencial energético de resíduos florestais do manejo sustentável e de resíduos da industrialização da madeira**. Disponível em: [http://www.epe.gov.br/sitespt/publicacoesdadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-312/NT-EPE\\_17-2018\\_Biomassa\\_Lenhosa-Residual\\_2018-10-17.pdf](http://www.epe.gov.br/sitespt/publicacoesdadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-312/NT-EPE_17-2018_Biomassa_Lenhosa-Residual_2018-10-17.pdf). Acesso em: 15 jul. 2019.

Brasil. **Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em: 10 set. 2019.

BRIDGWATER, T. Biomass for energy. **Journal of Science of Food and Agriculture**, v. 86, n. 12, p. 1755–1768, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.2605>

BRITO, J. O. REFLEXÕES SOBRE QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL PARA USO SIDERÚRGICO. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, N. 0100–3453, 1993.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão: 2. Densidade da madeira x densidade do carvão. **Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais**. n.20, p.101-113, jun.1980.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I. Densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. **Instituto de Pesquisa Florestal**. n.14, p.9-20, 1977.

BRITO, J. O. Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira. **Documentos Florestais**, n.9, p.1-19, 1990.

BUSTAMANTE-GARCÍA, V.; CARRILLO-PARRA, A.; GONZÁLES-RODRÍGUEZ, H.; RAMÍREZ-LOZANO, R. G.; CORRAL-RIVAS, J. J.; GARZA-OCAÑAS, FORTUNATO. Evaluation of a charcoal production process from forest residues of *Quercus sideroxyla* Humb., & Bonpl. in a Brazilian beehive kiln. **Industrial Crops and Products**, v. 42, n. 1, p. 169–174, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.04.034>



CARNEIRO, A. C. O.; BARCELLOS, D. C.; SANTOS, R. C. **Treinamento carvão vegetal: apostila teórica e prática**. Viçosa-MG, 2011. 129 p.

CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; FREDERICO, P. G. U.; FIALHO, L. F.; FIGUEIRÓ, C. G.; SILVA, C. M. S. Efeito do material genético e do sítio na qualidade do carvão vegetal de madeira de curta rotação. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 46, n. 4, p. 473 - 480, out. / dez. 2016. DOI: 10.5380/rf.v46i3.45704 473

CETEC – FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. 1982. **Manual de construção e operação de fornos de carbonização. Serie de publicações técnicas**, Belo Horizonte, N 7. V. 1. 55P.

CGGE. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Uso de Carvão Vegetal em Mini Altos-Fornos Situação Atual com Tendências 2025: Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico**. Belo Horizonte: Cgee, 2008.

CHEN, Z.; WANG, M.; JIANG, E.; WANG, D.; ZHANG, K.; REN, YONGZHI.; JIANG, Y. Pyrolysis of Torrefied Biomass. **Trends in Biotechnology**. P. 1–12, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2018.07.005>

CRUZ, C. R.; FERREIRA, R. S.; ALMEIDA, J. M.; BITTENCOURT, J. G. Propriedades da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus* sp. cultivados na região do Recôncavo da Bahia. **Magistra**, Cruz das Almas – BA, V. 27, N.2, p.188-198, Abr./Jun. 2015

CTFT – Centre Technique Forestier Tropical. 1972. **Resultados de 20 estudos dos produtos da destilação das madeiras amazônicas**. CTFT. 32 pp.

CTFT – Centre Technique Forestier Tropical. **Resultados de 20 estudos dos produtos da destilação das madeiras amazônicas**. 1972. 32pp.

DEMIRBAS, A. Higher heating values of lignin types from wood and non-wood lignocellulosic biomasses. **Energy sources, part a: recovery, utilization, and environmental effects**. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/15567036.2016.1248798>

DIAS JÚNIOR, A. F.; ANDRADE, C. R.; BRITO, J. O.; MILAN, M. Desdobramento da Função Qualidade (QFD) na Avaliação da Qualidade do Carvão Vegetal Utilizado para Cocção de Alimentos. **Floresta e Ambiente**, 2015; 22(2):262-270. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.105314>

DIONIZIO, A. F.; VALE, A. T.; MOREIRA, A. C. O.; GALVÃO, L. G. O.; CHAVES, B. S.; COSTA, M. A. Agregação de valor a resíduos agroindustriais para fins energéticos. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 42, n. 2, p. 251-260, jun. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.19084/rca.15129>

DONATO, D. B.; MAGALHÃES, M. A.; CARNEIRO, A. C. O.; SILVA, C. M. S.; W. C. CANAL.; SILVA, M. L. Viabilidade econômica de diferentes sistemas de produção de carvão vegetal em escala industrial. **Ciência da Madeira**. 8(3): 143-149, 2017 DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v8n3p143-149

ELOY, E.; SILVA, D. A.; CARON, B. O.; ELI, E. F.; SCHWERZ, F. Effect of age and spacing on biomass production in forest plantations. **Revista Árvore**, v. 42, n. 2, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-90882018000200014>

ERNSTING, A. Biomass Gasification & Pyrolysis: How UK support for “energy innovation” leads to business failures and particularly inefficient and dirty biomass power stations. **BIOFUEL WATCH**. 2015.

FERREIRA, L. R. A.; OTTO, R. B.; SILVA, F. P.; DE SOUZA, S. N. M.; ANDO JUNIOR, O. H. Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 440-455, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.034>

FEUERBACHER, A.; SIEBOLD, M.; CHHETRI, A.; LIPPENT, C.; SANDER, K. Increasing forest utilization within Bhutan's forest conservation framework: The economic benefits of charcoal production. **Forest Policy and Economics**, v. 73, p. 99-111, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.forpol.2016.08.007>

FORTALEZA, A. P.; NASCIMENTO FILHO, J. J. P.; CERETTA, R. P. S.; BARROS, D. S.; SILVA, S. S. Biomassa de espécies florestais para produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**. Santa Maria, v. 29, n. 3, p. 1436-1451, Sept. 2019. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509831639>

FREITAS, F. P.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; GOUVÊA, A. F. G.; CARVALHO, A. G.; PEREIRA, M. P. C. F. Decomposição térmica de resíduos lignocelulósicos visando seu aproveitamento para fins energéticos. **Ciência da Madeira**. 2017. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v8n1p29-35

FROELICH, P. L.; MOURA, A. B. D. Carvão vegetal: propriedades físico-químicas e principais aplicações. **Tecnologia e Tendência**. v.9 n1. Jan/jun.2014

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS – CETEC. **Produção e Utilização de Carvão Vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. 393 p.

HILLIG, E.; DIGNER, T.; DIAS, A. N. Propriedades físico-mecânicas da madeira de uva-do-japão. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, p. 1-6, 2018. <http://dx.doi.org/10.4336/2018.pfb.38e201601195>

IBM Corp. Released. **IBM SPSS Statistics**, Version 20.0. Armonk, NY: IBM Corp.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2015**. PG. 77, BRASILIA, 2015.

ISBAEX, C. **Influência da densidade do carvão vegetal na produção de ferro gusa**. 2018. Tese Doutorado. Universidade Federal de Viçosa. 107f.

JESUS, M. S.; COSTA, L. J.; FERREIRA, J. C.; FREITAS, F. P.; SANTOS, L. C.; ROCHA, M. F. V. Caracterização energética de diferentes espécies de Eucalyptus. **Floresta**, v. 47, n. 1, p. 11-16, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v47i1.48418>

KANURY, A. M.; BLACKSHEAR, P. L. On the combustion of wood II : The influence of internal convection on the transient pyrolysis of cellulose. *Combust. Sci and Tech.* 2. Pp 2-9

LEITE, E. R. S.; PROTÁSIO, T. P.; ROSADO, S. C. S.; TRUGILHO, P. F.; , TONOLI, G. H. D.; BUFALINO, L. Avaliação da qualidade da madeira de *Coffea arábica* como fonte de bioenergia. **CERNE**, v. 20 n. 4, p. 541-549, 2014. DOI: 10.1590/01047760201420041282

LIMA, E. A.; SILVA, H. D.; TUSSOLINI, E. L. **Potencial do *Eucalyptus benthamii* para produção de carvão vegetal em fornos convencionais.** Colombo, PR. ISSN: 1980-3982, agosto, 2012.

LINS, T. R. S.; BRAZ, R. L.; SOUZA JUNIOR, C. G. C., CORREIA, H. T. V.; SILVA, T. C.; WALTER, L. S. Rendimento e caracterização do carvão vegetal de galhos de *Mimosa caesalpinhiifolia* Benth. **BIOFIX Scientific Journal** v. 5 n. 1 p. 39-43 2020. DOI: dx.doi.org/10.5380/biofix.v5i1.67394

MATOS, J. Preparação de carga. In: ABM – **Curso sobre redução de minérios de ferro em alto-forno.** 3.ed. São Paulo, 1976. p.21-55.

MEIRA, A. M. D.; BRITO, J. O.; RODRIGUEZ, L. C. E. Estudo de Aspectos técnicos, econômicos e sociais da produção de carvão vegetal no Município de Pedra Bela, São Paulo, Brasil. **Revista Árvore**, v.29, n.5, p.809-817, 2005.

MENDES, M. G.; GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. **Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal.** 1982.

MOUTINHO, V. H. P.; ROCHA, J. J. M.; AMARAL, E. P.; SANTANA, L. G. M. ÁGUIAR, O. J. R. Propriedades Químicas e Energéticas de Madeiras Amazônicas do Segundo Ciclo de Corte. **Floresta e Ambiente**, 2016; 23(3): 443-449. DOI: https://doi.org/10.1590/2179-8087.131715

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, p. 319–330, 2011.

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319-330, 2011.

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319-330, 2011. DOI: 10.4336/2011.pfb.31.68.319

NOBRE, J, R, C.; Produção e qualidade do carvão ativado de reis duos madeireiros de espécies do Estado do Pará. **Dissertação Mestrado.** Universidade Federal da Lavras. 2013.

NOBRE, J. R. C.; CASTRO, J. P.; BIANCHI, M. L.; BORGES, W. M. S.; PAULO FERNANDO TRUGILHO, P. F.; MOULIN, J. C.; NAPOLI, A. Caracterização do carvão ativado produzido a partir de serragens de maçaranduba. **Cientia Forestalis**. Piracicaba, v. 43, n. 107, p. 693-702, set. 2015.

NOGUEIRA, L.A.H.; LORA, E.E.S. 2003. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro: Interciência, 2.ed. 199pp.

NUMAZAWA, C. T. D.; NUMAZAWA, S.; PACCA, S.; M. JOHN, V. Logging residues and CO<sub>2</sub> of Brazilian Amazon timber: two case studies of forest harvesting. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 122, p. 280-285, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.016>

NUMAZAWA, S. **Aproveitamento de resíduos de exploração florestal em Curuá-Una/Pa, para produção de carvão vegetal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), 1986. 126 f. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. 1986.

NUMAZAWA, S. **Contribution à l'étude de la pyrolyse lente du bois sous pression – Détermination de paramètres optima de procede et des caractéristiques des produits obtens**. 2000. Tese Doutorado. Université de Technologie de Compiègne. 230pp.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; DAMÁSIO, R. A. P. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.37, n.3, p.557-566, 2013.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, 2010.

OLIVEIRA, J. B.; VIVACQUA FILHO, A.; MENDES, G. M. E.; GOMES, O. P. A. Produção de carvão vegetal, aspectos técnicos. In: **CETEC**. Carvão vegetal. Belo Horizonte, p. 63-102. 1982.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**. Viçosa, v. 29, n. 1, p. 115-127, Feb. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622005000100013>

OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* sm. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.27, n.3, p.381-385, 2003.

OLIVEIRA, R. S.; SILVA, L. F. F.; ANDRADE, F. W. C.; TRUGILHO, P. F.; PROTASIO, T. P.; GOULART, S. L. Qualidade do carvão vegetal comercializado no Sudeste Paraense para cocção de alimentos. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 62, p. 1-9, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.22491/rca.2019.3017>

OLIVEIRA, J.B.; VIVACQUA FILHO, A.; MENDES, M.G.; GOMES, P.A. 1982. Produção de carvão vegetal – aspectos técnicos. In: **CETEC**. Produção e Utilização de Carvão Vegetal. Belo Horizonte. P.59- 72 (SPT-008)

PACHECO, J. J.; PALHETA, M. V. O.; COSTA JÚNIOR, R. N. F.; SILVA, S. V. C. W. **GOVERNO DO ESTADO DO PARÁ**. Secretaria de estado de planejamento, orçamento e finanças instituto de desenvolvimento econômico, social e ambiental do Pará estatística municipal.

PANSHIN, A.J.; ZEEUW, C. **Textbook of technology**. 3. ed., New York, McGraw Hill. 722p, 1980.

PELANDA, K. A.; POTULSKI, D. C.; SILVA, D. A.; FERRAZ, F. A. Avaliação das possíveis implicações do uso de diferentes biomassas florestais como biocombustível em geradores de vapor. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 6, n. 2, p. 112–121, 2015. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v6n2p112-121

PEREIRA, B. L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; OLIVEIRA, A. C.; SANTOS, L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; MAGALHÃES, M. A. Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 545-557, abr.-jun., 2016. DOI: 10.5902/1980509822755

PEREIRA, B. L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; OLIVEIRA, A. C.; SANTOS, L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; MAGALHÃES, M. A. Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 545-557, jun. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509822755>

PEREIRA, D.; SANTOS, D.; VEDOVETO, M.; GUIMARÃES, J.; VERÍSSIMO, A. Fatos Florestais da Amazônia. Belém, PA: **Imazon**, 2010. 124 p. ISBN 978-85-86212-31-4

PEREIRA, J. C. D.; SCHAITZA, E. G.; BAGGIO, A. J. Propriedades físicas e químicas e rendimentos da destilação seca da madeira de *Grevillea robusta*. **Embrapa Florestas**. Circular técnica, 40. ISSN 1517-5278, 2000. 10 p.

PEREIRA, J. C. D.; STURION, J.A.; HIGA, A.R.; HIGA, R.C.V.; SHIMIZU, J.Y. Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. Colombo: **EMBRAPA Florestas**, 113p. Documentos, 38, 2000.

PETROFF, G.; DOAT, J. Pyrolyse des bois tropicaux – Influence de la composition chimique de bois sur les produits de distillation. **Revue Bois et Forêt des Tropiques**. Nojent sur Marne/France. Centre Technique Forestier Tropical – CTFT. 1978. 177:51-64.

PICANCIO, A. C. S.; ISABEX, C.; SILVA, M, L.; SALLES, T. T.; RÊGO, L. J. S.; SILVA, L. F.; Controle do processo de produção de carvão vegetal para siderurgia. **Caderno de Administração**, v. 12, p. 1–17, 2018.

PINHEIRO, P. C. C.; VIANA, E.; REZENDE, M. E. A.; SAMPAIO, R. S. A. **Produção de Carvão vegetal**. Belo Horizonte, MG, 2006. 103 p.

PINHEIRO, P.C.C.; SAMPAIO, R.S.; REZENDE, M.E.A.; VIANA, E.A. **Produção de carvão vegetal: teoria e prática**. 2006. Belo Horizonte. 1 EDIÇÃO, 120 P.

PINTO, A.; AMARAL, P.; SOUZA JUNIOR, C.; VERÍSSMO, A.; SALOMÃO, R.; GOMES, G. BALIEIRO. **Diagnóstico Socioeconômico e Florestal do Município de Paragominas**. Relatório Técnico. Belém/PA: Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia - Imazon. 65 p 2009.

RAAD, T. J. **Cadeias de Produção de Carvão Vegetal para o Setor Siderúrgico: Avaliação de metodologias relevantes para a análise e quantificação da eficiência de cadeias de produção de carvão vegetal**. Projeto BRA/14/G31 – Produção de Carvão Vegetal de Biomassa Renovável para a Indústria Siderúrgica no Brasil.

RAMOS, D. C.; CARNEIRO, A. C. O.; TANGSTAD, M.; SAADIEH, R.; PEREIRA, B. L. C. Quality of Wood and Charcoal from Eucalyptus Clones for Metallurgical Use. **Floresta Ambiente**. Seropédica, v. 26, n. spe2, e20180435, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.043518>

REIS, A.A.; MELO, I. C. N. A.; PROTASIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O. Efeito de local e espaçamento na qualidade do carvão vegetal de um clone de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Floresta e Ambiente**, v.19, n.4, p.497-505, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2012.055>

ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. **Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira**. Campinas: UNICAMP, 2005.

ROUSSET, P; FIGUEIREDO, C.; SOUZA, M.; QUIRINO, W. Pressure effect on the quality of eucalyptus wood charcoal for the steel industry: A statistical analysis approach. **Fuel Processing Technology**, v. 92, n. 10, p. 1890–1897, 2011. DOI: 10.1016/j.fuproc.2011.05.005

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; SOUZA, M. M. de.; CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; SOUZA, M. M.; CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.

SATONAKA, S. Carbonization and Gaseification of Wood. Energy from forest biomass. Ed. By W. Ramsay Smith College of Forests resources. University of Washington, Scattle. Washington. **XVIIIUFRO World Congress Energy Group Proceeding**. Academic Press. 1982. P.147-154

SILVA, C. M. S.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C.; VITAL, B. R.; ALVES, I. C. N.; MAGALHÃES, M. A. Stability to thermal degradation and chemical composition of woody biomass subjected to the torrefaction process. **European Journal of Wood**



and **Wood Products**, v. 74, n. 6, p. 845-850, 2016. **DOI:** <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1060->

SILVA, D. A.; ALMEIDA, V. C.; VIANA, L. C.; KLOCK, U.; MUNIZ, G. I. B.; Avaliação das propriedades energéticas de resíduos de madeiras tropicais com uso da espectroscopia NIR. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 561-568, 2014. **DOI:** 10.1590/2179-8087.043414

SILVA, L.; OLIVEIRA, L.; SILVA, H.; SOUSA, P.; BARROS, D. Aproveitamento energético de resíduos da indústria moveleira. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 5, n. 2, p.36-42, 2018. **DOI:** <http://dx.doi.org/10.15210/rbes.v5i2.14557>

SILVA, M. G.; NUMAZAWA, S.; ARAUJO, M. M.; NAGAISHI, T. Y. R.; GALVÃO, G. R. Carvão de resíduos de indústria madeireira de três espécies florestais exploradas no município de Paragominas, PA. **Acta Amazônica**, v. 37, n. 1, p.61-70, 2007. **DOI:** <http://dx.doi.org/10.1590/s0044-59672007000100007>

SILVA, R. R.; MATHIAS, F. R. C.; BAJAY, S. V. Potential energy efficiency improvements for the Brazilian iron and steel industry: Fuel and electricity conservation supply curves for integrated steel mills. **Energy**, 2018. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.055>

SILVA, W. A. S. Avaliação da influência da densidade do carvão vegetal nos custos de transporte. **Dissertação Mestrado**. Universidade Federal de Viçosa. 2017.

SILVA, L. F. F.; CASTRO, A. R. S.; OLIVEIRA, R. S.; SILVA, S. S.; PAMPLONA, V. M. S.; BARROS, D. S.; NOBRE, J. R. C.; NUMAZAWA, S. Seleção de espécie, temperatura e tempo de carbonização na produção de carvão vegetal com resíduos madeireiros da Amazônia. **Pesquisa Florestal Brasileira**. 2020. **DOI:** <https://doi.org/10.4336/2020.pfb.40e201801737>

SMITH, H. E.; JONES, D.; VOLLMER, F.; BAUMERT, S.; M. RYAN, C.; WOOLLEN, E.; LISBOA, SÁ N.; CARVALHO, M.; FISHER, J. A.; LUZ, A. C.; M. GRUNDY, I.; PATENAUDE, G. Urban energy transitions and rural income generation: Sustainable opportunities for rural development through charcoal production. **World Development**, v. 113, 2019, 237–245. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.08.024>

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; JULIANA HÖFLER, J.; PEREIRA, A. J. Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. **CERNE**, v. 21 n. 2, p. 191-197, 2015. **DOI:** 10.1590/01047760201521021294

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J.; HOFER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 3, p. 543-549, Jun, 2014. **DOI:** <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000300017>

SOUZA, N. D. DE.; AMODEI, J. B.; XAVIER, C. N.; DIAS JUNIOR, A. F.; CARVALHO, A. M. Estudo de Caso de uma Planta de Carbonização: Avaliação de Características

e Qualidade do Carvão Vegetal Visando Uso Siderúrgico. **Floresta e Ambiente**. v. 23, n. 2, p. 270–277, 2016. DOI: 10.1590/2179-8087.106114

TELEKEN, J. G.; BONASSA, G.; SCHNEIDER, L. T.; PARISOTTO, E. I. B.; OLIVEIRA, A. F.; Potencial dendroenergético de combustíveis sólidos de *Eucalyptus grandis*. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**. Florianópolis, n especial. p.523-531, dez. 2015.

TRUGILHO, P. F.; Goulart, S. L.; ASSIS, C. O.; COUTO, F. B. S.; ALVES, I. C. N.; PROTASIO, T. P.; NAPOLI, A. Características de crescimento, composição química, física e estimativa de massa seca de madeira em clones e espécies de *Eucalyptus* jovens. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 45, n. 4, p. 661-666, abr. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20130625>.

TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A.; PROTÁSIO, T. P.; ARAÚJO, A. C. C. HEIN, P. R. G. Efeito da idade e material genético no rendimento e qualidade do carvão vegetal de eucalipto. **Ciência da Madeira**, 6(3): 202-216, 2015. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v6n3p202-216

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himeneia courbaril* L.). **Scientia Agraria**, v. 2, n. 1, p.45-53, 2001. <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v2i1.976>

VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. E. Relação entre as propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 1, p. 137-145, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/198050981767>

VALENTE, A.F. Carbonização de Madeira de Eucalipto. **Informe Agropecuário** 141: p. 74-79. 1986.

VERÍSSIMO, A.; LIMA, E.; LENTINI, MARCO.; **Pólos Madeireiros do Estado do Pará**. Belém: Imazon 2002 74 p.; 27 cm. ISBN 85-86212-06-7

VIEIRA, R. S.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; SELVATTI, T. S.; BARAÚNA, E. E. P.; NAPOLI, A. Influência da temperatura no rendimento dos produtos da carbonização de *Eucalyptus microcorys*. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 1, p. 59-64, 2013.

## ANEXO 1 – AUTORIZAÇÃO DE EXPLORAÇÃO FLORESTAL – AUTEF -SEMAS

 <p>GOVERNO DO ESTADO DO PARÁ SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE - SEMAS/PA</p>	
<b>Autorização</b>	
<b>AU Nº.: 3781/2018</b>	<b>VALIDADE ATÉ: 03/08/2019</b>
<b>PROCESSO Nº.: 2016/0000014031</b>	<b>DATA DO PROTOCOLO: 18/04/2016</b>
<p><i>A Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade, no uso de suas atribuições que lhe confere a Lei Estadual nº. 5.457, de 11 de maio de 1.988, alterada pelas Leis nº. 5.752, de 26 de julho de 1.993 e nº. 7.026, de 30 de julho de 2.007, e em conformidade com a Lei nº. 5.887, de 09 de maio de 1.995, concede a presente licença ao empreendimento abaixo discriminado.</i></p>	
<b>NOME / RAZÃO SOCIAL / DENOMINAÇÃO:</b>  <p style="text-align: center;"><b>CKBV FLORESTAL LTDA</b></p>	<b>FORTE:</b>  <p style="text-align: center;"><b>A-III</b></p>
<b>ENDEREÇO:</b> <p style="text-align: center;">Rodovia BR-010, Km 1564, S/Nº, Fazenda Rio Capim, Bairro: Zona Rural</p>	
<b>MUNICÍPIO:</b> <p style="text-align: center;">Paragominas - PA</p>	<b>CEP:</b> <p style="text-align: center;">68025-970</p>
<b>INSC. ESTADUAL/RO:</b> <p style="text-align: center;">15-209675-2</p>	<b>CNPJ/CNP:</b> <p style="text-align: center;">03.601.232/0004-64</p>
<p><b>A EXECUÇÃO DA ATIVIDADE ABAIXO DESCRITA:</b></p> <p>A presente Autorização está sendo emitida com base na análise técnica do processo 14031/2016, protocolado nesta SEMAS, para o qual foi emitido LAR Nº 2273/2017 E AUTEF Nº 272942/2016.</p> <p>Esta autorização – AU, SOMENTE da direito de USO DO SALDO DE VOLUME, constante no Sistema de Comercialização e Transporte de Produtos Florestais – SIFLORA, originado AUTEF Nº 272942/2016, com validade até 19/12/2018, considerando a proporção de 1:1 (Tora m³ – Resíduo m³), resultou em 140681,6319 m³ de resíduos florestais com volumetria de 29.8887 st/hã, de resíduo florestais. Considerando o que será convertendo de metro (m³) cúbico para metro estérneo (st), resultou no seguinte volume a volumetria a liberado.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Volume total de Resíduo Florestal de 211022,4478 st.</li> <li>- Volumetria de Resíduo Florestal: 44,98 st/hã.</li> </ul> <p>Ratificando que a Autorização é referente à uma exploração florestal legalmente autorizada por esta Secretaria de Meio Ambiente, sendo, o volume de resíduos florestais deliberados na AU, com validade de um ano.</p>	
<b>LOCAL E DATA:</b>	Belém - PA, 03 de agosto de 2018

Assinado eletronicamente. A assinatura digital pertence a:

Rose Cristine Queiroz Chaves 03/08/2018 15:31;

Walmir Carneiro Corumba 03/08/2018 15:28;

conforme horário oficial de Belém. A autenticidade deste documento pode ser conferida no endereço: <https://goo.gl/4Jhng8>





## APÊNDICE 1 – IMAGENS ILUSTRATIVAS DO TRABALHO



Área de manejo florestal sustentável



Resíduos do manejo florestal



Pátio de estocagem



Transporte dos resíduos até a carvoaria



Vista panorâmica da unidade de produção de carvão vegetal





Pátio de resíduos na carvoaria



Pátio de resíduos na carvoaria



Rotina na carvoaria



Rotina na carvoaria



Enchimento dos fornos



Interior do forno





Processo de ignição



Forno durante a carbonização



Fumaça na cor “azulada” sinaliza o final da carbonização



Descarregamento do forno





### Madeira mal carbonizada (TIÇO)





Carvão vegetal produzido após o agrupamento dos resíduos

